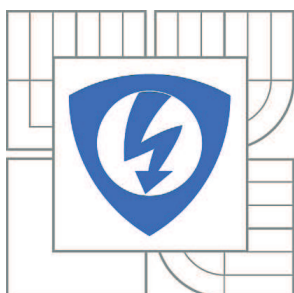


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

MEMRISTOR S PWL CHARAKTERISTIKOU

MEMRISTOR WITH PWL-TYPE CHARACTERISTIC

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

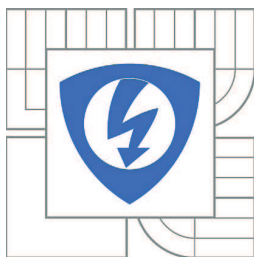
JIŘÍ HOLAS

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. DALIBOR BIOLEK, CSc.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Jiří Holas

Ročník: 3

ID: 134312

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Memristor s PWL charakteristikou

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je návrh a konstrukce memristoru s po částech lineární charakteristikou typu náboj-tok, který je navrhován do budoucích digitálních pamětí. Dílčím cílem projektu je rešerše současných teoretických poznatků z oboru, návrh koncepce obvodového řešení, případně počítačové simulace možné realizace memristoru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] BIOLEK, D., BIOLEK, Z., BIOLKOVÁ, V., Memristor a jeho místo v teorii obvodů. Slaboproudý obzor, roč. 65, č. 2, 2009, s. P1-P16.
- [2] CHUA, L.O., Resistance switching memories are memristors. Applied Physics A, vol. 2011, no. 102, pp. 765–783, 2011.
- [3] BIOLEK, D., BIOLKOVÁ, V., KOLKA, Z., Fourier Analysis of Memristor Excited by Sinusoidal Signal. In Proc. of Mathematical Models for Engineering Science (MMES'11), Tenerife, Spain, 2011, pp. 154-159.
- [4] BIOLKOVÁ, V., BIOLEK, Z., BIOLEK, D., Modelování memristoru z jeho konstituční relace. Slaboproudý obzor, 2010, roč. 66, č. 2, s. 1-3. ISSN: 0037- 668X.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 6.6.2013

Vedoucí práce: prof. Ing. Dalibor Biolek, CSc.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá analogovou emulací memristorové paměti s po částech lineární charakteristikou typu náboj-tok, která je navrhována do moderních digitálních pamětí. V první části dokumentu jsou shrnuty základní poznatky a vlastnosti memristoru pro správné modelování. V dalších částech je popsáno obvodové řešení a počítačová simulace. Připojen je i návrh desky plošných spojů a výsledky měření na prototypu emulátoru memristoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Memristor, PWL charakteristika, emulátor, obvodové řešení, třístavová paměť, simulace, PSpice, model, realizace.

ABSTRACT

Bachelor's thesis deals with an analog emulation of memristor memory with PWL-type characteristic which is designed for modern digital memories. The first part of the document summarizes the basic memristor characteristics and rules of their proper modeling. The next parts present the circuit implementation and computer simulation. The printed circuit board design and prototype measurement are included.

KEY WORDS

Memristor, PWL-type characteristic, emulator, circuit solution, three-state memory, simulation, PSpice, model, realization.

HOLAS, J. *Memristor s PWL charakteristikou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 53 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Dalibor Biolek, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Memristor s PWL charakteristikou“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto dokumentu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 6. června 2013

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Daliboru Biolkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

Obsah

Úvod	- 7 -
1 Memristor a jeho specifické vlastnosti	- 8 -
1.1 Konstituční relace memristoru	- 9 -
1.2 Hydromechanický model memristoru	- 10 -
1.3 Polovodičový model memristoru	- 12 -
1.4 Typické charakteristiky memristoru.....	- 14 -
2 Použití memristoru jako paměti	- 15 -
3 Memristor s po částech lineární charakteristikou	- 16 -
3.1 Obvodové řešení	- 17 -
3.1.1 Kompletní návrh obvodového řešení.....	- 18 -
3.1.2 Řídící logika.....	- 20 -
3.1.3 Integrátor.....	- 24 -
3.1.4 Napájecí blok	- 26 -
3.2 Simulace v programu OrCAD PSpice.....	- 27 -
3.3 Praktická realizace	- 32 -
3.3.1 Elektronické součásti	- 33 -
3.3.2 Převod proudu operačním zesilovačem OPA735.....	- 34 -
3.3.3 Převodník proud-náboj	- 35 -
3.4 Oživení a měření na prototypu	- 36 -
4 Závěr	- 44 -
5 Seznam použitých zdrojů literatury	- 45 -
6 Přílohy	- 46 -
7 Seznam obrázků	- 51 -
8 Seznam použitých přístrojů a programů	- 53 -

Úvod

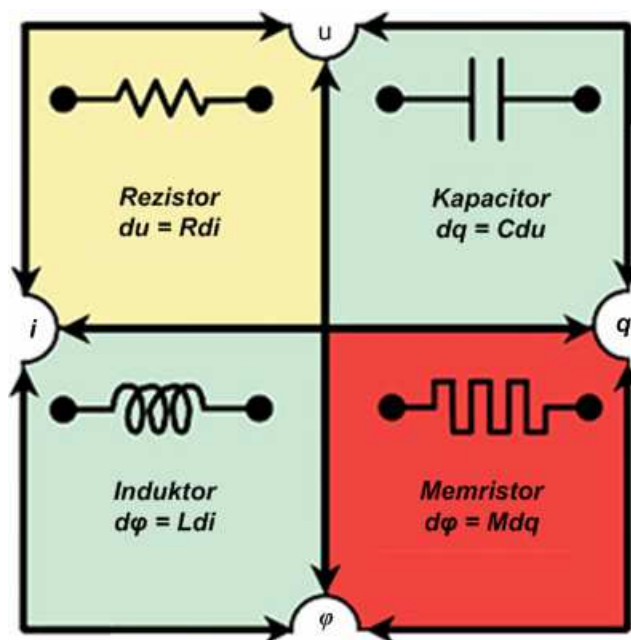
Historie memristoru jako čtvrté fundamentální pasivní součástky sahá do roku 1971, kdy v té době vědecký pracovník Leon Chua na kalifornské univerzitě v Berkeley publikoval svoji práci „Memristor – The missing Circuit Element“ [1]. Onu objevenou součástku nazval „memristor“, tedy jako složeninu dvou slov memory-resistor, která nejlépe vystihovala funkci předpovězené součástky. Teorie ovšem zapadla do pozadí zájmu tehdejší odborné veřejnosti, jelikož neshledala Chuovu vizi atraktivní. O to větší pozornosti se dostalo autorovi i jeho teorii, kterou podložil i funkčním analogovým modelem, když vědecký tým z laboratoří HP v kalifornském Palo-Alto vytvořil funkční prototyp [4] a potvrdil tak správnost tvrzení Leona Chuy.

V práci se zabývám analogovou emulací memristoru s po částech lineární charakteristikou, který se do budoucna jeví jako slibný nástupce dnešních FLASH pamětí. Cílem práce je návrh obvodu s pomocí aktivních analogových prvků, simulace v prostředí programu OrCAD PSpice a fyzická realizace memristoru na desku plošných spojů.

Motivací pro tvorbu této práce pro mne byl úspěch týmu v mezinárodní soutěži Analog Design Contest 2012 Europe, pořádanou společností Texas Instruments. Svoji práci však přímo nenavazuji na dosažené výsledky, ale zaměřuji svoji pozornost k vytvoření buňky, která by emulovala paměťový efekt reálného memristoru pomocí aktivních analogových prvků.

1 Memristor a jeho specifické vlastnosti

V teorii obvodových veličin byly do objevení čtvrté základní součástky (memristoru) známy obvodové prvky: rezistor (R), induktor (L) a kapacitor (C). Jsou typické svým poměrem mezi parametry, které je kategoricky charakterizují. Pro rezistor je to volt-ampérová charakteristika, pro induktor weber-ampérová charakteristika a pro kapacitor coulomb-voltová charakteristika. Profesor Leon Chua ve své publikaci [1] podrobně popisuje čtvrtý prvek, který je jednoznačný svojí weber-coulombovou charakteristikou a definuje tak veličinu zvanou *memristance* M , viz **obr. 1**.



Obr. 1: Základní obvodové prvky a jejich vzájemné relace. Překresleno z[2]

Definujme základní elektrické veličiny elektrické napětí u a elektrický proud i . Tok φ respektive elektrický náboj q je definován jako časový integrál zmíněných základních veličin. Vzájemná (konstituční) relace mezi q a φ naznačená na **obr. 1** tvoří charakteristiku součástky, kterou nelze nahradit žádnou kombinací zbývajících fundamentálních prvků. Právě proto je memristor považován za plnohodnotný základní prvek obvodových veličin. Schématická značka memristoru je uvedena na **obr. 2**.

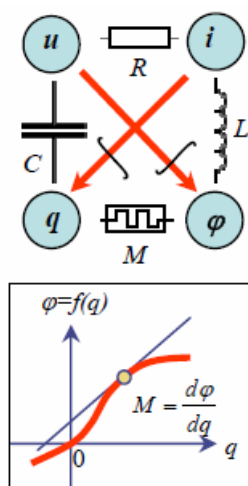


Obr. 2: Schématická značka memristoru.

1.1 Konstituční relace memristoru

Ve svém článku [1] Leon Chua předpovídá existenci memristoru na základě tzv. čtvercové symetrie. Ze čtveřice elektrických veličin napětí u , proudu i , náboje q a toku φ , je možné vytvořit dohromady 6 kombinací, tedy $u-i$, $q-u$, $\varphi-q$, $\varphi-u$, $\varphi-i$ a $q-i$. Vztahy mezi $\varphi-u$ a $q-i$ jsou dány derivacemi resp. integracemi v čase. Jelikož z těchto všech charakteristik lze odvodit jejich diferenciální veličiny (rezistance, indukance, kapacitance), zbývá podle Chuovy hypotézy existence čtvrté pasivní součástky se svojí jedinečnou diferenciální veličinou – memristancí, definovanou jako podíl $d\varphi/dq$. Rozměrová zkouška prokazuje, že jednotkou memristance je *Ohm*. Je obecně známo, že syntetický induktor lze vytvořit na základě pasivních RC prvků a aktivní součástky, např. operačního zesilovače. Stejně tak Chua v práci [1] popisuje možnost realizace syntetického memristoru na základě známých pasivních prvků a emulátorů. Právě těmito emulátory se hodlám ve své práci konkrétně zabývat a vytvořit tak autonomní třístavovou paměťovou buňku.

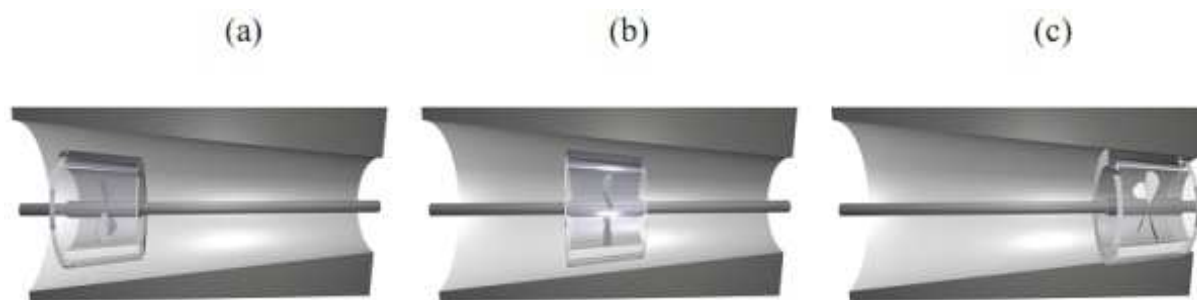
Jak již bylo řečeno, memristor je součástka, která vytváří přímou vazbu mezi tokem a elektrickým nábojem. Jejich zásadní význam pro vytvoření memristoru je patrný z **obr. 3**. Z pohledu správného modelování je důležité vybrání souřadné soustavy pro popis. Pro memristor je konstituční relací weber-coulombová charakteristika, která je jednoznačnou funkcí. Oproti tomu volt-ampérová charakteristika vykazuje hysterezi, což není explicitní vyjádření prvku. Z nejednoznačné volt-ampérové charakteristiky snadno přejdeme na jednoznačnou charakteristiku – konstituční relaci – pokud na osy nevynášíme napětí a proud, ale jejich časové integrály [2]. Této skutečnosti využijeme v praxi, kde k pozorování chování a funkce memristoru jako paměti využijeme transformaci na jednoznačnou konstituční relaci.



Obr. 3: Konstituční relace memristoru [2].

1.2 Hydromechanický model memristoru

Memristor je ve své podstatě rezistor, který mění svou hodnotu odporu v závislosti na množství proudu, který jím protekl za určitý časový okamžik. Pokud ovšem přerušíme průtok proudu, memristor si hodnotu odporu zapamatuje. K rychlému a jednoduchému pochopení funkce uvedu hydromechanický model **obr. 4**, který svojí analogií vystihuje chování memristoru, jak je uvedeno v práci [3].



Obr. 4: Hydromechanický model memristoru. a) R_{on} minimální hodnota odporu, b) R_{mid} střední hodnota odporu, c) R_{off} maximální hodnota odporu [3].

Trubička, kterou prochází proud kapaliny představuje memristor, kterým analogicky protéká elektrický proud. Procházející proud tekutiny roztáčí vrtulku a tím pohybuje zátkou ve směru protékajícího proudu. Tím se mění aktivní průřez a tudíž i odpor, který trubice klade procházející tekutině. Nejmenší odpor je dosažen v případě a) na **obr. 4**, kdy proud tekutiny prochází jak přes vrtulku, tak i kolem zátky. Naopak největšího odporu lze dosáhnout v mezní situaci v případě c), kdy proud tekutiny prochází pouze přes vrtulku. Při přerušení průtoku tekutiny se zátka přestane pohybovat a pamatuje si polohu, která odpovídá hodnotě odporu do té doby, dokud proud tekutiny nezačne opět působit na plochu zátky. Díky zapamatování polohy zátky a tudíž i odporu systému si trubička pamatuje i celý objem tekutiny q , který jí v minulosti prošel. To nám umožňuje definovat odpor trubice jako funkci $R=R(q)$. Cílem je spojitá změna polohy vrtulky, tedy analogicky odporu R podle množství proteklého proudu i a zamezení stavu, kdy se zátka dostane do krajní polohy.

Jak lze pozorovat na **obr. 3** již zmíněná relace mezi elektrickým nábojem q a tokem φ matematicky definuje chování memristoru v rovnici (1). Jak tok, tak i elektrický náboj jsou dány integrály napětí respektive proudu podle rovnice (2) a (3), jak je uvedeno v práci [3].

$$f(\varphi, q) = 0 \quad (1)$$

$$\varphi(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau \quad (2)$$

$$q(t) = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \quad (3)$$

Definujme pojem memristance jako poměr:

$$M(q) = \frac{d\varphi(q)}{dq} \quad (4)$$

Protože napětí memristoru je obdobou Ohmova zákona, můžeme s pomocí rovnice (4) psát:

$$u(t) = M(q(t)) \cdot i(t) \quad (5)$$

Analogicky pro proud definujeme memduktanci jako,

$$W(q) = \frac{dq(\varphi)}{d\varphi} \quad (6)$$

pak je proud memristorem dán vztahem,

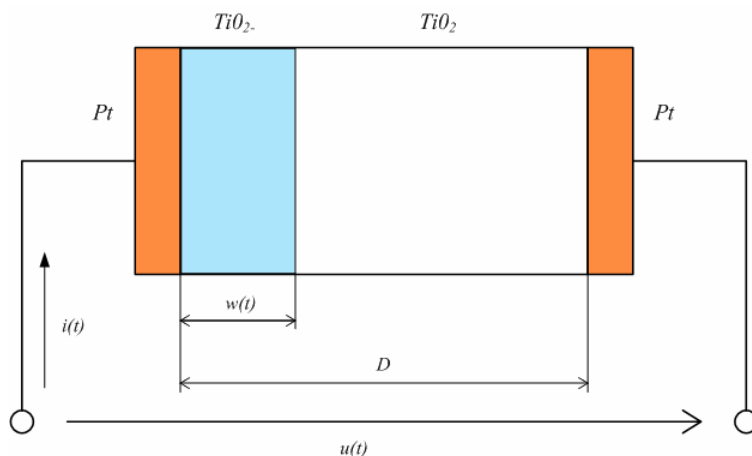
$$i(t) = W(\varphi(t)) \cdot u(t) \quad (7)$$

kde hodnota memristance závisí na integrálu proudu respektive napětí v čase od $t = -\infty$ do t .

1.3 Polovodičový model memristoru

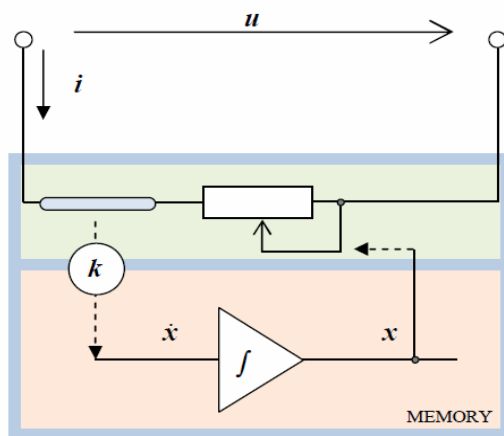
Následující kapitoly (1.3, 1.4 a 2) vycházejí z informací obsažených v literatuře [2] a [3], kde autor podrobně vysvětluje princip funkce memristorové paměti, její matematický popis a analogie mezi typy modelů memristoru.

Vědci z laboratoří HP v Palo-Alto fyzicky vytvořili memristor jako polovodičovou nanosoučástku [4]. Skládá se z tenké vrstvy oxidu titaničitého TiO_2 tloušťky $D=(10-30)$ nm, která je uzavřena mezi dvě platinové elektrody. Je obecně známo, že oxid titaničitý je dobrým izolantem, proto je u jedné z elektrod ochuzen o atomy kyslíku, čímž je docíleno vytvoření dopantů, v tomto případě kladně nabitých děr a díky tomu se chová jako polovodič s dobrou vodivostí. Průchodem protékajícího proudu se rozhraní vodivé a nevodivé vrstvy pohybuje právě ve směru polarity proudu a tím je dosaženo změny odporu celého memristoru, viz **obr. 5**.



Obr. 5: Polovodičový model memristoru HP. Překresleno z [2].

Analogií mezi hydromechanickým modelem na **obr. 4** a reálným polovodičovým modelem memristoru na **obr. 5** lze vyjádřit strukturální schéma, ze kterého můžeme matematicky popsat chování memristoru, viz **obr. 6**.



Obr. 6: Strukturální schéma memristoru [2].

Zvolme za stav x poměr $x=w/D$ viz **obr. 5**, kde x bude bezrozměrné číslo v intervalu $<0;1>$. Pak na základě článku [2] můžeme psát:

$$\frac{dx}{dt} = ki(t) \quad (8)$$

Je stavová rovnice pro popis memristorové paměti a

$$u(t) = R_{mem}(x)i(t) \quad (9)$$

je rovnice, popisující rezistivní port.

Dále

$$\begin{aligned} R_{mem}(x) &= xR_{on} + (1-x)R_{off} = R_{off} - x\Delta R \\ \Delta R &= R_{off} - R_{on} \end{aligned} \quad (10)$$

odpovídá odporu memristoru, který lze nastavit v mezích $R_{mem}(0) = R_{off}$ až $R_{mem}(1) = R_{on}$.

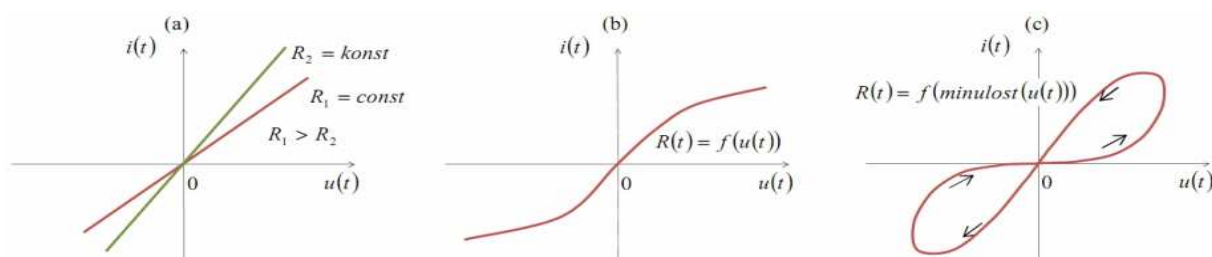
Přehled hydromechanických analogií je pro přehlednost strukturován do tabulky **tab. 1**.

Tab. 1: Analogie mezi hydromechanickým a polovodičovým modelem memristoru [2].

Hydromechanický model memristoru	Polovodičový memristor
Tlakový spád na trubičce p [Pa]	Napětí mezi vývody memristoru u [V]
Rychlost průtoku kapaliny v [m^3/s]	Elektrický proud i [A]
Rychlost zátky V [m/s]	Rychlost rozhraní V [m/s]
Objem kapaliny q , která prošla trubičkou [m^3]	Elektrický náboj q , který prošel memristorem [C]
Poloha zátky x [m]	Poloha rozhraní w [m]
Odpor trubičky R [$Pa \cdot s \cdot m^{-3}$]	Odpor memristoru R [Ω]

1.4 Typické charakteristiky memristoru

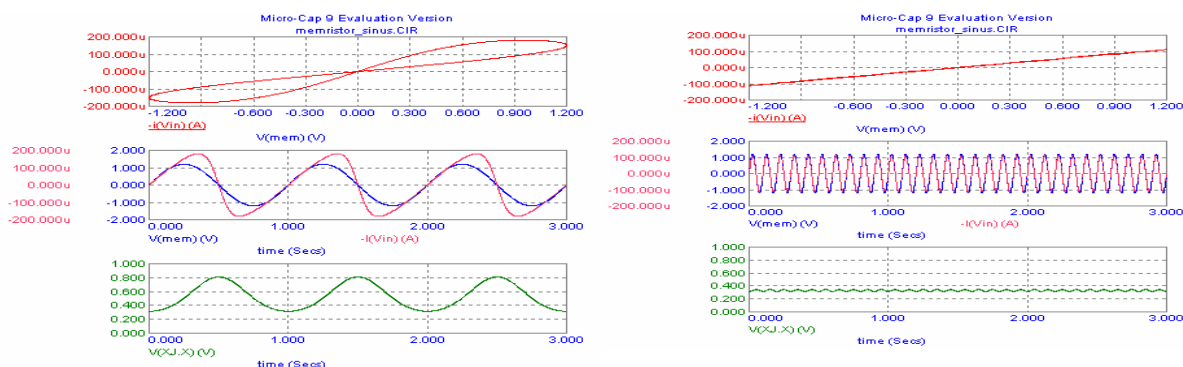
Jelikož memristor je stejně jako obyčejný rezistor pasivní součástka, musí jeho voltampérová charakteristika procházet počátkem souřadnicové sítě a ležet celá v 1. a 3. kvadrantu [2]. Problém nastává, když chceme změřit jeho statickou voltampérovou charakteristiku. Připojením součástky k nenulovému zdroji napětí uvedeme do pohybu rozhraní mezi vodivou a nevodivou vrstvou a tato skutečnost za určitý časový úsek povede k tomu, že se memristor dostane do jednoho ze svých krajních stavů. Z toho vyplývá, že statickou voltampérovou charakteristiku nelze měřit. Jako řešení se jeví charakteristiky, získané při buzení přesným periodickým signálem s nulovou střední hodnotou, který bude pohybovat vnitřním rozhraním na obě strany. V případě provedení tohoto způsobu měření dostaneme typickou závislost odporu $R(t)$ memristoru na **obr. 7c**.



Obr. 7: V-A charakteristiky (a) lineární rezistor, (b) nelineární rezistor, (c) memristor [3].

U memristoru je okamžitý odpor $R(t)$ závislý nejen na okamžitém stavu systému, ale i na kompletní minulosti, která tomuto stavu předcházela. Hysterezní smyčka je typickým znakem paměťového systému, neboť v rámci jedné periody má v každém bodě jedinečnou směrnici pro následující pohyb pracovního bodu. Se zvětšující se frekvencí budícího signálu se typická smyčka vytrácí a přechází v úsečku pouze s jednou směrnici přímky, viz **obr. 8b** z práce [3].

Tento jev je způsoben klesáním rozdílu maximální a minimální hodnoty odporu, neboť vnitřní rozhraní urazí za kratší periodu kratší časový úsek. Z toho vyplývá, že se memristor na vysokých kmitočtech chová jako obyčejný rezistor s lineární charakteristikou, ovšem to neznamená, že přestává plnit svoji funkci.



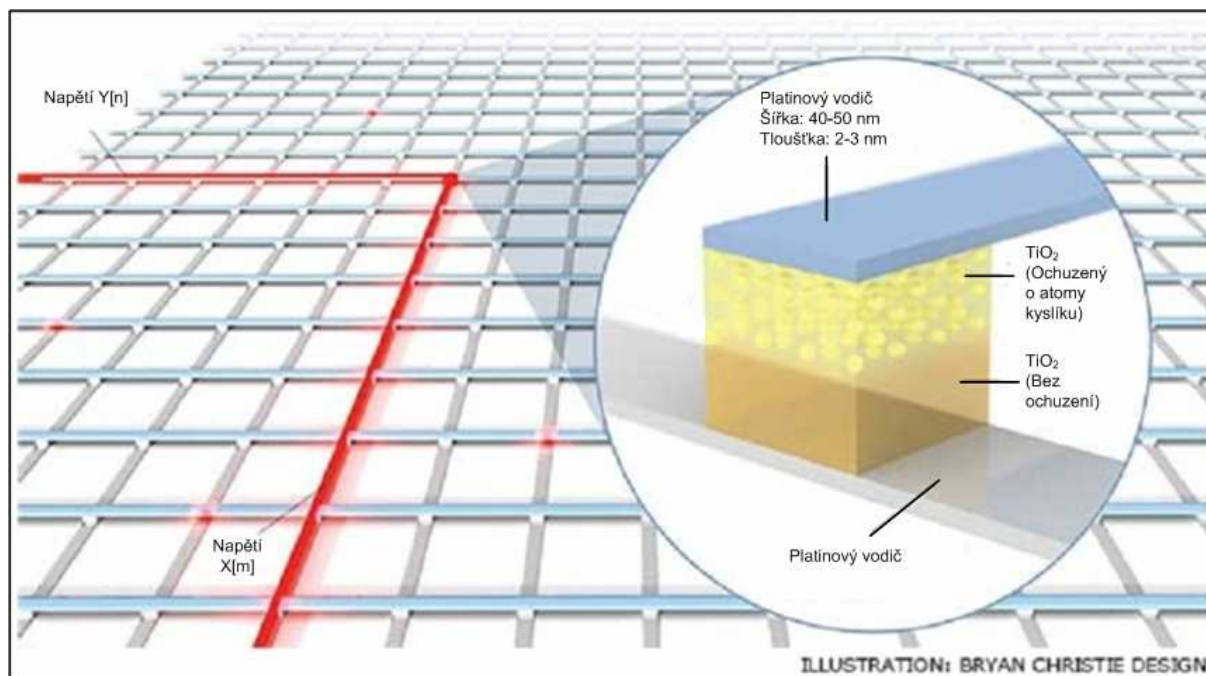
Obr. 8: Charakteristiky memristoru pro kmitočty a) 1Hz, b) 10Hz [2].

2 Použití memristoru jako paměti

Odborná veřejnost spatřuje jako hlavní možnost využití memristoru v budoucích paměťových strukturách počítačů. Proto se uvádí v práci [2] maticová struktura (crossbar structure), kde jsou jednotlivé paměťové buňky spojené do matice podle **obr. 9**. Tato příčková struktura je tvořena křížením vodičů tzv. rastrem. Jak lze pozorovat, v místě křížení jsou od sebe horizontální a vertikální vodiče odděleny memristorem. Z toho plyne velmi jednoduché adresování paměťové buňky, neboť postačuje vybuzení dvojice vodičů $X[m]$, $Y[n]$.

Zápis se do takovéto struktury provádí pomocí napěťového impulzu, který délkou svého trvání způsobí dodání určité velikosti náboje a tím se z principu změní odpor paměťové buňky.

V případě čtení z analogové memristorové buňky, tedy zjištění aktuální hodnoty odporu memristoru, se využívá principu měření proudu, respektive napětí, při současné aplikaci definovaného napětí na zvolenou paměťovou buňku. Problém je bohužel v tom, že takovéto měření má za následek změnu odporu, neboť minimální změna proudu, respektive napětí, uvede do pohybu rozhraní mezi vodivou a nevodivou vrstvou. Problém se řeší obdobně jako u měření volt-ampérové charakteristiky v kapitole (1.4), tedy čtením pomocí dokonale symetrického sinusového signálu malé amplitudy o vysokém kmitočtu.

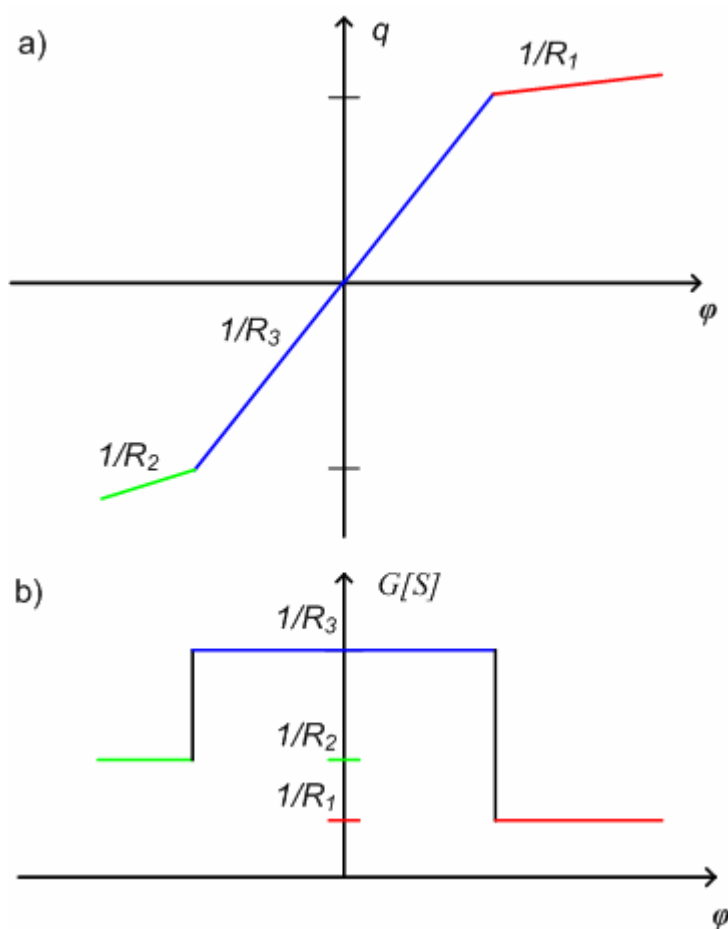


Obr. 9: Maticová struktura memristorové paměti. Překresleno z [2]

V současné době oznámilo vedení firmy v čele se společností Hynix, která rezistivní paměti na bázi memristoru hodlá pro HP vyrábět, odložení komerčního vydání na poslední kvartál roku 2013. Více informací lze nalézt v článku [5].

3 Memristor s po částech lineární charakteristikou

V této kapitole vycházím z práce [6] „Resistance switching memories are memristors”, kde autor uvádí po částech lineární charakteristiku jako příklad správného modelování činnosti memristoru jako více stavové paměti. Pokud budeme vynášet integrály proudu i a napětí u , tedy veličiny elektrický náboj q a tok φ do souřadnicového systému, získáme jednoznačnou konstituční relaci. Na **obr. 10** je patrná závislost mezi φ a q , která je po částech lineární. Pojem po částech lineární vychází z anglického sousloví **Piece-Wise Linear** (dále pouze PWL). Každé směrnici lomené přímky, ze kterých je průběh složen, odpovídá jedna hodnota elektrického odporu, respektive vodivosti ($1/R_1$, $1/R_2$ a $1/R_3$).



Obr. 10: a) PWL charakteristika, b) odpovídající velikost odporu. Překresleno z [6].

Moje bakalářská práce má za úkol docílit právě takovýchto průběhů, neboť jednoznačně určují chování a stav emulované analogové paměti. Dále se ve své práci zabírám složením jednotlivých obvodových členů tak, aby se celé zařízení jevílo na svých výstupních svorkách jako plovoucí (neuzemněné) a bylo autonomně napájeno pomocí USB rozhraní. Dále aby se jednoduše ovládalo a dobře simulovalo paměťový efekt memristoru.

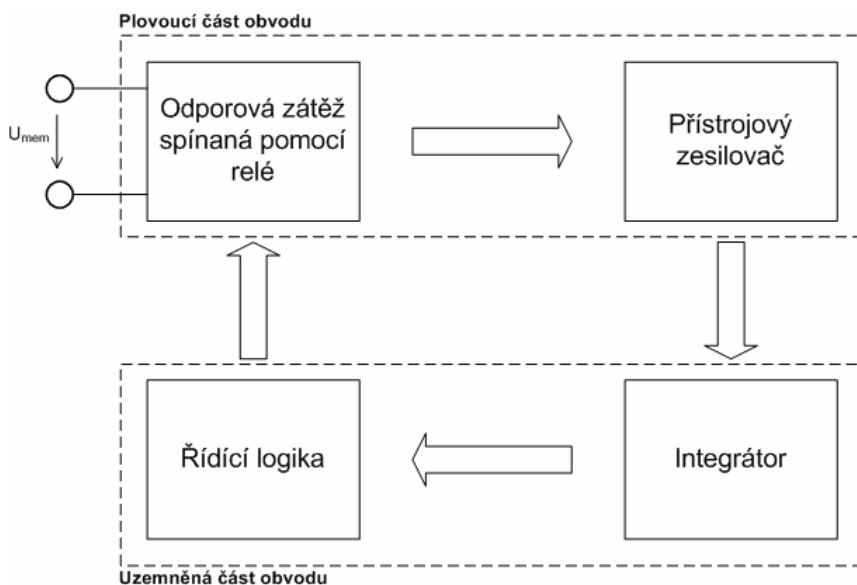
3.1 Obvodové řešení

Pro využití memristoru v digitální technice, zejména v oblasti digitálních pamětí, je hlavním bodem výzkumu vytvoření zařízení, které dokáže interpretovat dvoustavovou logiku. Tedy zajistit pracovní oblast memristoru tak, aby díky změně zapisovacího napětí, a tím vyvolané změny odporu, bylo možné jednoznačně určit stavy soustavy v daném intervalu. U fyzického memristoru je to jednoduché. Postačí definovat, jaká hodnota odporu bude logická 1 a na druhé straně, jaký odpor má soustava při stavu logické 0.

S emulováním činnosti memristoru jako vícestavové paměti je to poněkud složitější. Jako jedna ze zmíněných možností se jeví využití řízeného přepínání rezistorů, jejichž elektrický odpor představuje stav paměti memristoru v uživatelem definovaných logických úrovních. K řízenému přepínání zmíněných rezistorů je zapotřebí vytvořit logiku, která by reagovala na změnu vstupního „zapisovacího“ napětí a dokázala jednoduše přepínat rezistorovou zátěž tak, aby bylo dosaženo požadovaných stavů paměti. Jinak řečeno, mohou být definovány následující požadavky. Například při vstupním napětí $+5V_{DC}$ je stav paměti log.1, čemuž odpovídá hodnota odporu memristoru $R=100\ \Omega$. V tom případě musí logika správně vyhodnotit, který odpor bude do zátěže připojen. Tohoto požadavku lze jednoduše dosáhnout pomocí komparace vstupního budícího signálu s referenční hodnotou napětí.

K tomuto účelu je již dlouhá desetiletí přímo vytvořen komparátor. Jedná se ve své podstatě o analogový operační zesilovač, kde na jednom z jeho vstupů vytvoříme požadovaný potenciál, odpovídající komparační úrovni. Na druhý vstup přivedeme budící signál, (předpokládáme harmonický sinusový signál o nenulové amplitudě) a při překročení námi definované úrovně napětí na referenčním vstupu dojde k překlopení do jednoho ze dvou stavů komparátoru. Tímto principem můžeme ovládat spínací prvek, který bude spínat požadovanou zátěž podle svého aktuálního vybuzení.

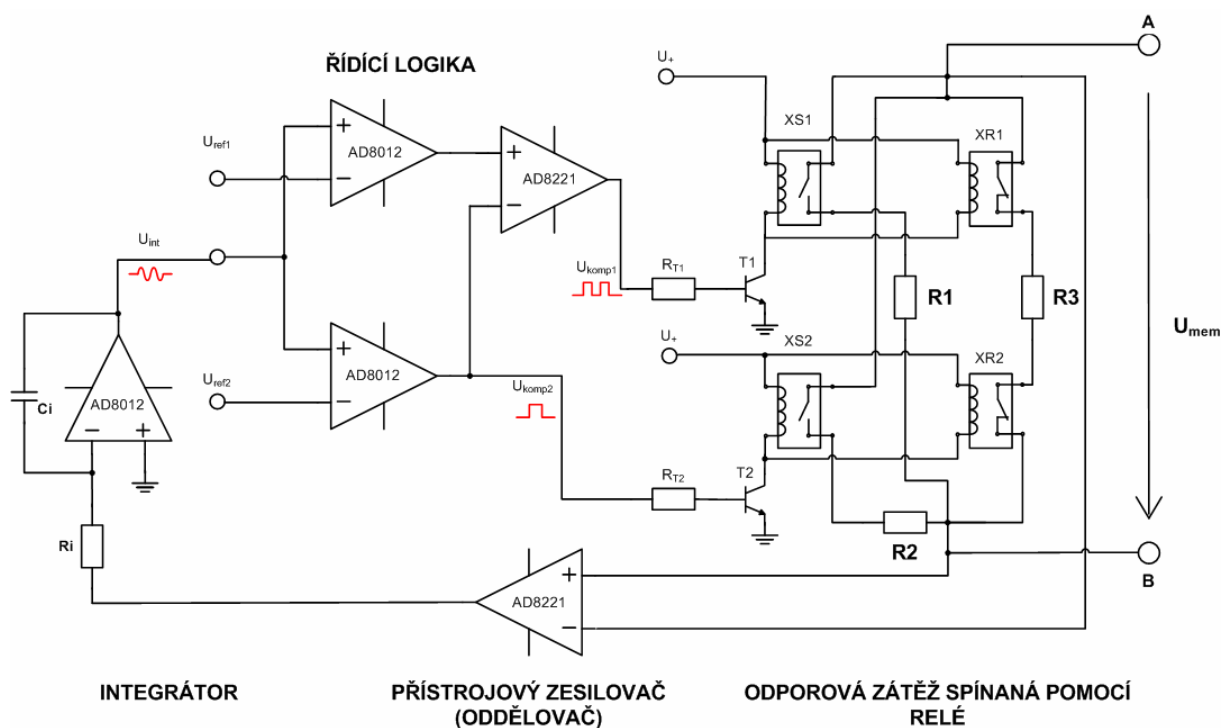
Jako ideální spínací prvek pro moji aplikaci se jeví relé. Jeho přechodový odpor v sepnutém stavu je zanedbatelný. Další nespornou výhodou je galvanické oddělení řídicí logiky od spínané zátěže a tím minimalizaci vlivu rušení. Tím se dostáváme k samotnému obvodovému řešení problému. Na **obr. 11** je naznačeno blokové schéma zapojení memristoru emulující chování třístavové paměti. Vstupně výstupními svorkami U_{mem} můžeme ovládat proces zápisu a čtení informace. Zároveň touto vstupní branou, pomocí budícího signálu, měříme charakteristiky memristoru, jako je hysterezní křivka, odpor memristoru v čase a zejména PWL charakteristiku.



Obr. 11: Blokové schéma memristorové paměti.

3.1.1 Kompletní návrh obvodového řešení

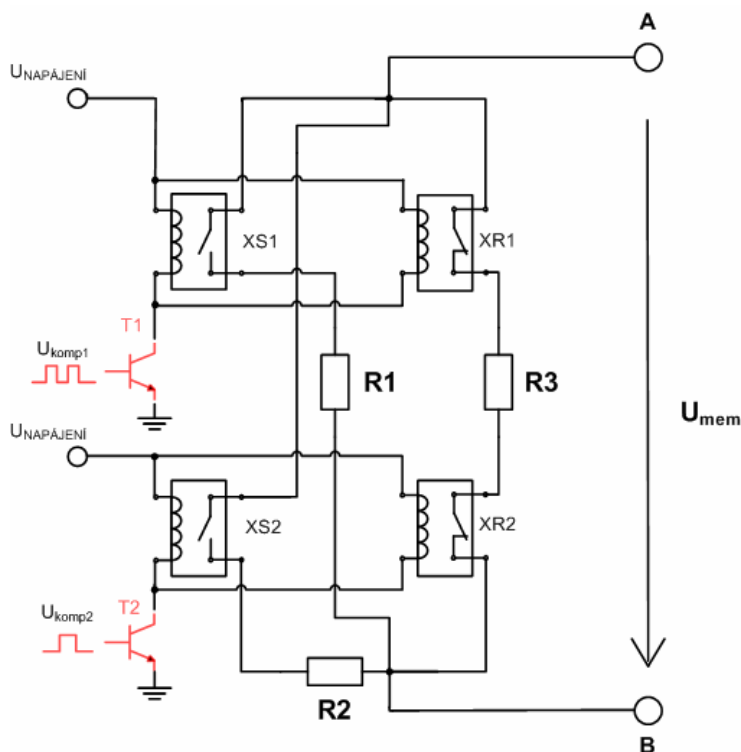
Návrh obvodového řešení memristoru jako třístavové paměti je zobrazen na **obr. 12**. Sestává se ze čtyř základních bloků, které budou podrobně popsány v jednotlivých odstavcích. Připojením stejnosměrného napětí na svorky U_{mem} vybudíme celý obvod a podle nastavení řídicí logiky se odporová zátěž odpovídajícím způsobem sepne. Tímto principem bude docíleno požadovaného paměťového efektu memristoru.



Obr. 12: Kompletní obvodové řešení emulátoru memristoru.

Rezistorová zátěž spínaná pomocí relé

Tento blok je stěžejní pro emulaci memristoru jako paměti. Tvoří opravdové jádro celé myšlenky. Nominální hodnoty rezistorů $R1$, $R2$ a $R3$ představují odpor memristoru při definovaných logických stavech. Jako spínač rezistorů je použito dvou typů relé plnících funkci spínání respektive rozpínání. $XS1$ a $XS2$ představují spínací relé, naopak $XR1$ a $XR2$ plní funkci opačnou. Schématické uspořádání je zobrazeno na **obr. 13**.



Obr. 13: Zapojení odporové zátěže se spínacími a rozpínacími relé.

Jako výchozí můžeme považovat stav, kdy na řídicích vstupech U_{komp1} a U_{komp2} je nulové ovládací napětí. V tomto stavu jsou tranzistory neaktivní, kontakty rozpínacích relé $XR1$ a $XR2$ sepnuty a rezistor $R3$ je tak připojen mezi uzly A a B .

Při příchodu ovládacího impulsu na řídicí vstup U_{komp1} se spíná tranzistor $T1$, tím se aktivuje spínací relé $XS1$ a díky tomu je rezistor $R1$ připojen mezi uzly A a B . Jelikož je k spínacímu relé připojeno paralelně relé rozpínací $XR1$, plnící opačnou funkci, rezistor $R3$ není připojen mezi společné uzly A a B .

Stejný princip platí i při příchodu ovládacího impulsu na řídicí vstup U_{komp2} , tedy relé $XS2$ je sepnuto a tím je sveden rezistor $R2$ do společného uzlu. Naopak relé $XR2$ je rozepnuto a přívod napětí k rezistoru $R3$ je přerušen. Tato logická funkce je pro přehlednost zobrazena v **tab. 2**.

Tab 2: Logická tabulka odporové zátěže spínané mezi uzly A a B .

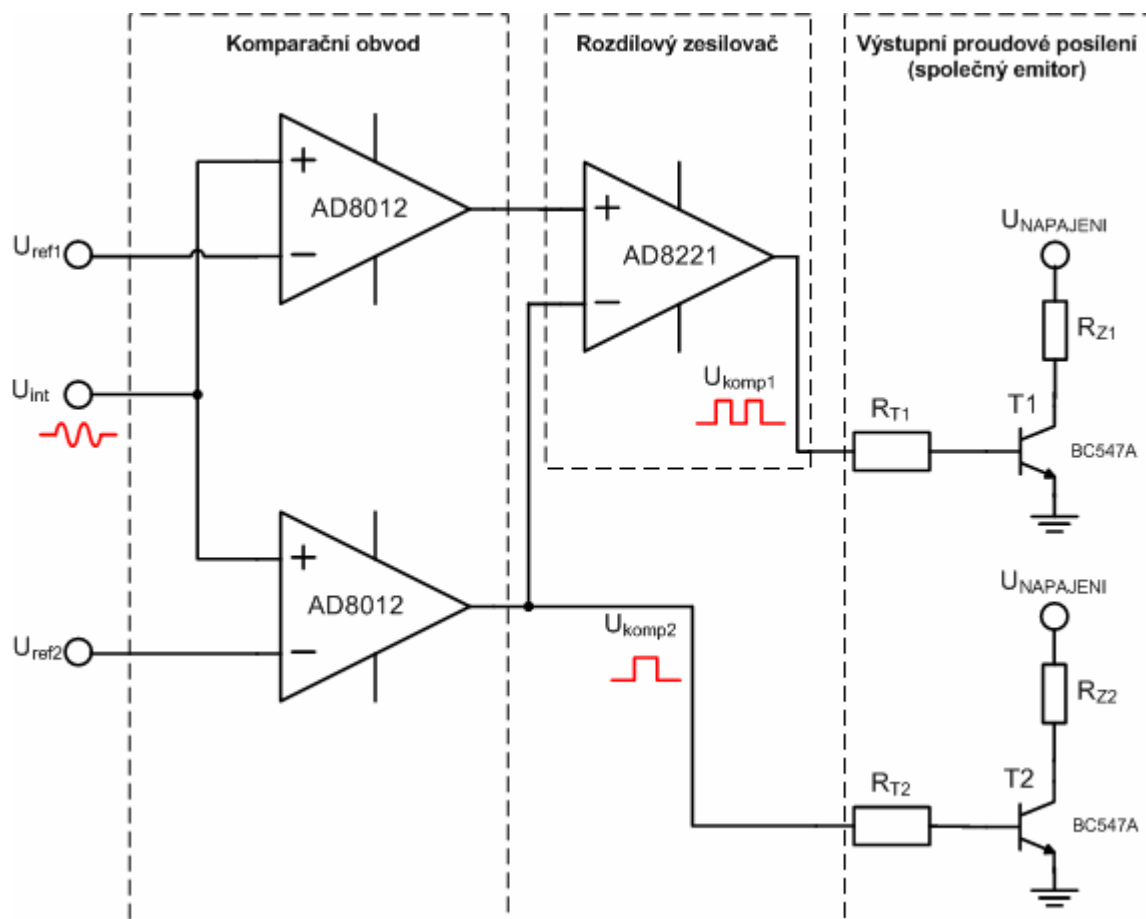
Komparační napětí		Odporová zátěž		
U_{komp1} [V]	U_{komp2} [V]	$R1$	$R2$	$R3$
5	0	ON	OFF	OFF
0	5	OFF	ON	OFF
0	0	OFF	OFF	ON

Stav, kdy by na oba řídicí vstupy přišlo ovládací napětí, je považován za hazardní. Řídicí logika komparátorového bloku je konstruována tak, aby k tomuto nežádoucímu stavu nedošlo. To blíže popisuje následující kapitola (3.1.2 **Řídicí logika**). Úlohou odporové zátěže spínané pomocí relé je, aby v každém okamžiku byl sepnut pouze jeden rezistor mezi uzly *A* a *B*.

Tranzistory *T1* a *T2* jsou v zapojení použity pouze z důvodu proudového posílení výstupu komparátorů. Více je uvedeno v následující kapitole v odstavci **Výstupní proudové posílení**.

3.1.2 Řídicí logika

Máme vytvořen základní blok odporové zátěže. K jeho buzení ovšem potřebujeme logiku zmiňovanou výše. Schéma zapojení řídicí logiky je zobrazeno na **obr. 14**. Dále bude popsáno složení jednotlivých částí řídicí logiky.



Obr. 14: Obvodové schéma řídicí logiky.

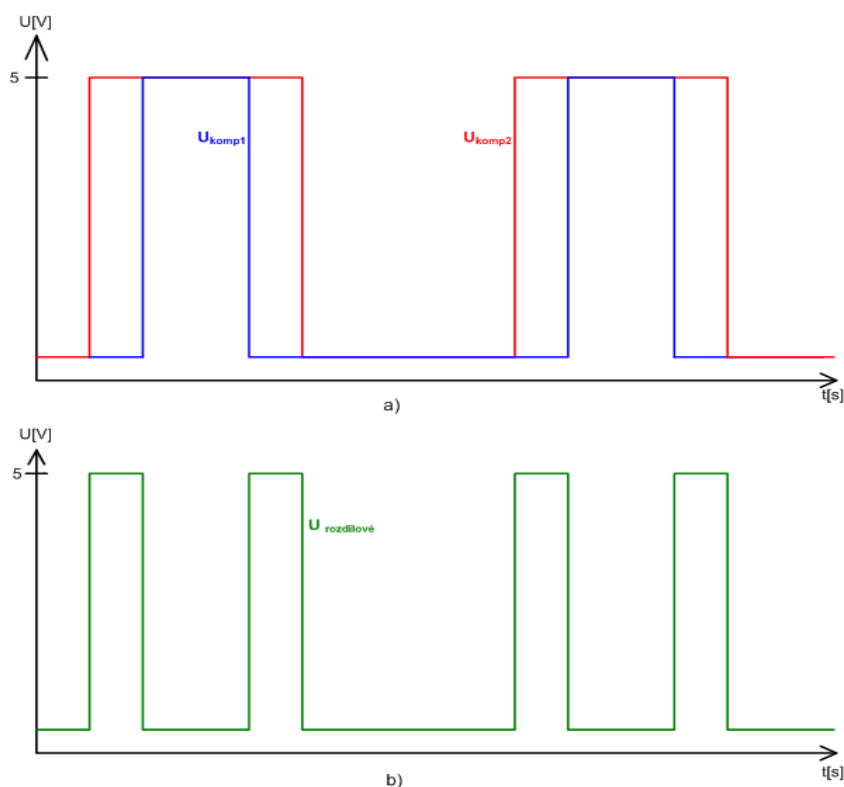
Komparační obvod

Sestává se z dvou operačních zesilovačů AD8012 od společnosti Analog Devices [7], které jsou zapojeny jako komparátory vstupního napětí. Porovnávají tedy společné vstupní napětí z integrátoru U_{int} vzhledem k nastavenému referenčnímu napětí U_{ref1} , resp. U_{ref2} .

Je-li vstupní napětí na neinvertujícím vstupu zesilovače větší nežli referenční napětí na invertujícím vstupu, objeví se na výstupu komparátoru kladné saturační napětí. Tento princip umožňuje vytvořit dvojici výstupních periodických průběhů, kterých je zapotřebí k řízení odporové zátěže s relé.

Rozdílový zesilovač

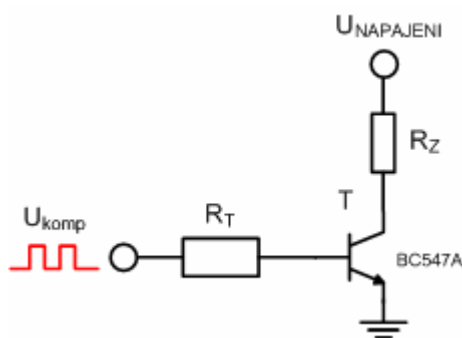
Výstupem komparátorů je periodický obdélníkový signál. Zobrazením výstupních napětí komparátoru a jejich překrytím do jednoho grafu můžeme pozorovat průběhy s rozdílnou střídou, avšak oba průběhy v určitém časovém úseku dosahují stejné hodnoty nenulového napětí **obr. 15a**. Jak již bylo zmíněno, tento stav je při spínání odporové zátěže hazardní, tedy nesmí nastat. Jako jedno z řešení se nabízí použití rozdílového operačního zesilovače. Díky rozdílu dvou signálů bude dosaženo podmínky, aby nebyla relé $XS1$, $XS2$ resp. $XR1$, $XR2$ aktivní současně, tedy aby nedocházelo k hazardním stavům, viz **obr. 15b**. Klasické rozdílové, neboli diferenciální zesilovače se pro můj návrh příliš nehodí z důvodu velkých nároků na přesnost externích pasivních součástek (rezistorů), aby zesilovač opravdu zesiloval pouze rozdílový signál. Proto jsem zvolil ve svém zapojení přístrojový zesilovač AD8221 od společnosti Analog Devices [8], který je konstruován právě pro tyto přesné aplikace. Jelikož využívám funkce přístrojového zesilovače i k oddělení uzemněné a plovoucí části obvodu, rozeberu podrobněji jeho funkci v části pojmenované **Přístrojový zesilovač**.



Obr. 15: a) Výstupy komparátoru U_{komp1} , U_{komp2} ; b) rozdíl signálů U_{komp1} a U_{komp2} .

Výstupní proudové posílení

Je tvořeno *NPN* tranzistory *BC547A* s předřadnými odpory v bázi obou tranzistorů. Díky proudově zesilovacímu činiteli β lze proudově posílit signál z výstupů řídicí logiky a docílit tak spolehlivého spínání odporové zátěže. Rezistor R_Z na **obr. 16** zastupuje paralelně spojená vinutí spínacího a rozpínacího relé. Vezmeme-li v potaz malý odpor vinutí cívek relé (výrobce uvádí $R_{coil}=150\ \Omega$) a dále jejich paralelní spojení, je zřejmé, že způsobený proudový odběr nebude zanedbatelný. V odstavci níže naznačím výpočet teoretické proudové odběry.



Obr. 16: Schéma proudového posílení výstupu komparátoru.

Relé jsou spínána výstupním napětím z komparátoru o amplitudě 5V. Celkový odpor R_{CELK} bude při paralelním spojení spínacího a rozpínacího relé v jedné větvi odporové zátěže následující.

$$R_{CELK} = R_{XS1} \parallel R_{XR1} = 150 \parallel 150 = \underline{75\ \Omega} \quad (11)$$

Potom proud I_{CELK} , který odebírají relé, určím podle Ohmova zákona.

$$I_{CELK} = \frac{U_{NAP}}{R_{CELK}} = \frac{5}{75} = 0,0667\ A = \underline{66,7\ mA} \quad (12)$$

Z výsledku plyne, že pro obě větve bude celkový proud, který bude muset dodat komparátor a rozdílový zesilovač v součtu $I_{OUT}=133,4\ mA$. Pohybují se tedy za hranicí výstupního proudového výkonu zesilovačů (pro *AD8221* $I_{MAX}=110\ mA$). Výsledkem je nedostatečná velikost proudu pro správné spínání obou relé v jedné větvi zátěže, což se i projevilo v reálném měření. Jako řešení vzniklé situace při realizaci memristoru jsem využil tranzistorového spínače v zapojení se společným emitorem, kde mezi napájecí napětí a kolektor tranzistorů připojím paralelně spojené vinutí cívek relé, viz **obr. 12**. Díky proudově zesilovacímu činiteli β tranzistoru lze dostatečně zvýšit výstupní proudový výkon zesilovačů a tím docílit korektního spínání relé. Pro důkaz uvedu výpočet.

Pro *NPN* tranzistor *BC547A* je při napětí $U_{BE}=5\text{ V}$ a proudu kolektorem $I_C=100\text{ mA}$ (limitní proud) proudový zesilovací činitel $\beta=120$. Z těchto dvou parametrů mohu vypočítat hodnotu předřadného rezistoru R_T v bázi každého z tranzistorů. Ten chrání přechod *BE* před zničením a současně nastavuje pracovní bod tranzistoru. Předpokládám výstupní napětí komparátoru $+5\text{ V}$ pro *AD8012* a $+4\text{ V}$ pro *AD8221* (není „rail to rail“). Velikost rezistorů v bázi R_T budu dimenzovat následovně.

Jak již bylo spočteno v rovnici (12) celkový proud pro spolehlivé spínání relé je $I_{CELK}=66,7\text{ mA}$ a prochází kolektorem tranzistoru. Výpočet proudu bází bude následující.

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{66,7 \cdot 10^{-3}}{120} = \underline{0,556\text{ mA}} \quad (13)$$

Z toho vyplývá velikost odporu v bázi R_{T1} tranzistoru *T1* podle Ohmova zákona,

$$R_{T1} = \frac{U_{KOMP1} - U_{BE}}{I_B} = \frac{4 - 0,65}{0,556 \cdot 10^{-3}} = \underline{6,028\text{ k}\Omega} \quad (14)$$

kde úbytek napětí na přechodu *BE* je napětí, které je nezbytné pro otevření tranzistoru.

Analogický bude i výpočet odporu v bázi R_{T2} pro tranzistor *T2* s tím rozdílem, že výstup komparátoru U_{komp2} má větší napěťový rozkmit signálu, neboť je oproti *AD8221* „rail to rail“. Proto budu uvažovat saturační napětí $+5\text{ V}$ na výstupu komparátoru, tedy

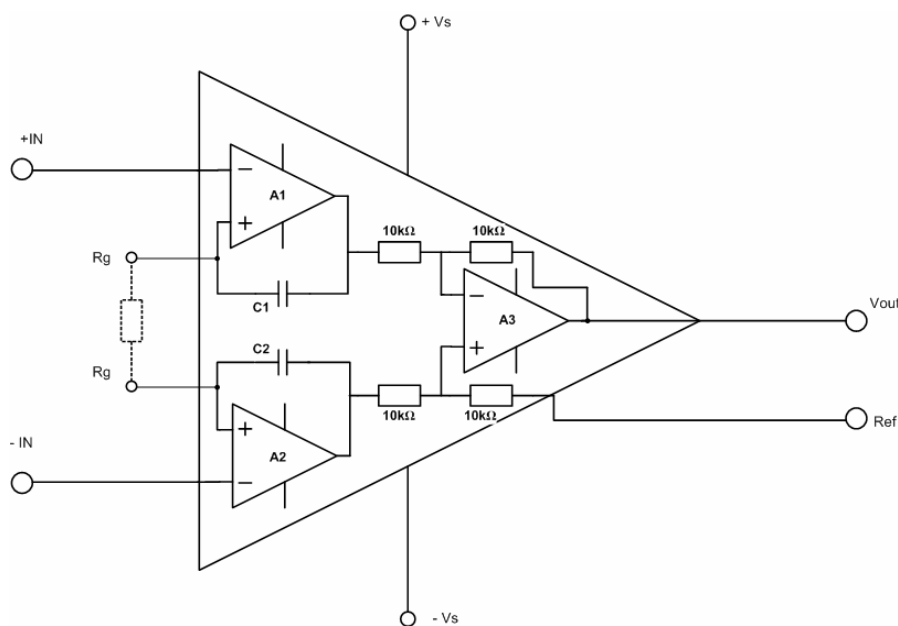
$$R_{T2} = \frac{U_{KOMP2} - U_{BE}}{I_B} = \frac{5 - 0,65}{0,556 \cdot 10^{-3}} = \underline{7,8\text{ k}\Omega}. \quad (15)$$

Tyto výsledné hodnoty rezistorů použiji při fyzické realizaci memristoru, více je o obvodovém uspořádání pojednáno v kapitole (3.3).

Přístrojový zesilovač

Aby se emulátor choval jako reálná memristorová paměť, je důležité, aby se odporová zátěž spínaná pomocí relé chovala jako plovoucí. Tedy napětí na vstupně výstupních svorkách nesmí být vztaženo k nulovému potenciálu. Toho lze jednoduše dosáhnout pomocí již zmiňovaného přístrojového zesilovače. Vnitřní zapojení přístrojového zesilovače je uvedeno na **obr. 17**. Sestává se ze tří operačních zesilovačů. Zesilovače *A1* a *A2* tvoří vysokoimpedanční rozdílový stupeň. Operační zesilovač *A3* tvoří spolu s přesnými rezistory o hodnotě $10\text{ k}\Omega$ tzv. Howlandův obvod a realizuje tak rozdílovou funkci zesilovače. Zisk zesilovače lze korigovat pomocí rezistoru přiloženého mezi svorky *Rg*. V našem případě potřebujeme zesílení $A=1$, proto tyto svorky rozpojíme (v simulaci rozpojení nahradíme velkou hodnotou rezistoru). Připojením vstupních svorek zesilovače na společné uzly

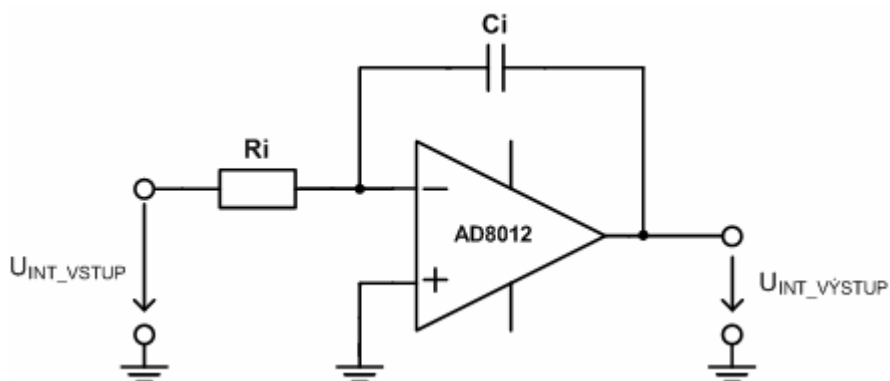
A, B a výstupu přístrojového zesilovače na vstup integračního článku dosáhneme požadovaného oddělení uzemněné a plovoucí části obvodu **obr. 12**. Důvod pro výběr zesilovače AD8221 je velmi vysoká udávaná hodnota $CMRR = 80 \text{ dB}$ (Common Mode Rejection Ratio) ve velkém frekvenčním rozsahu. Pro moji aplikaci není faktor vysokých frekvencí důležitý, neboť zařízení bude pracovat na relativně malých kmitočtech do stovek Hz. Důležitý je právě faktor potlačení souhlasného signálu a tím zesílení pouze rozdílové složky obou signálů, což AD8221 výborně splňuje.



Obr. 17: Zjednodušené vnitřní schéma přístrojového zesilovače AD8221 společnosti Analog Devices (napětí značeno v). Překresleno z [8].

3.1.3 Integrátor

Pro korektní modelování memristivního systému je zapotřebí vynášet do souřadnicového systému integrály napětí u a proudu i , tedy tok φ respektive náboj q . Napětí je tedy nejprve nutné integrovat, čímž vznikne tok, a zobrazením poměru získat požadované charakteristiky. K tomuto účelu v zapojení využívám jednoduchý integrační článek na **obr. 18**.



Obr. 18: Integrační článek s AD8012.

Důležitým faktorem ovlivňujícím funkčnost celého obvodu je časová konstanta τ . Budeme-li chtít, aby zařízení pracovalo do frekvence $f = 15 \text{ Hz}$, musíme tomu uzpůsobit hodnoty pasivních součástek. Vhodným zvolením velikosti odporu a kapacity dosáhneme požadovaného frekvenčního rozsahu. Matematicky jej můžeme vyjádřit takto:

$$\tau = R \cdot C \quad (16)$$

kde τ je časová konstanta integračního članku a její převrácená hodnota odpovídá úhlovému kmitočtu ω .

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad (17)$$

Přenos integračního članku tedy je.

$$Au = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot R \cdot C} \quad (18)$$

V našem případě požadujeme přenos integračního članku $Au = 1$ při frekvenci $f = 15 \text{ Hz}$. Po drobné úpravě dostáváme.

$$\frac{1}{2\pi \cdot f} = R \cdot C \quad (19)$$

Dosažením požadované frekvence f do vztahu a vyjádřením odporu R a kapacity C dostáváme parametry pasivních součástek integračního članku pro definovanou frekvenci.

Pro frekvenci 15 Hz můžeme ze vztahu (19) psát.

$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 15} = R \cdot C$$

Hodnotu kapacity volíme 33 nF a vyjádříme odpor R .

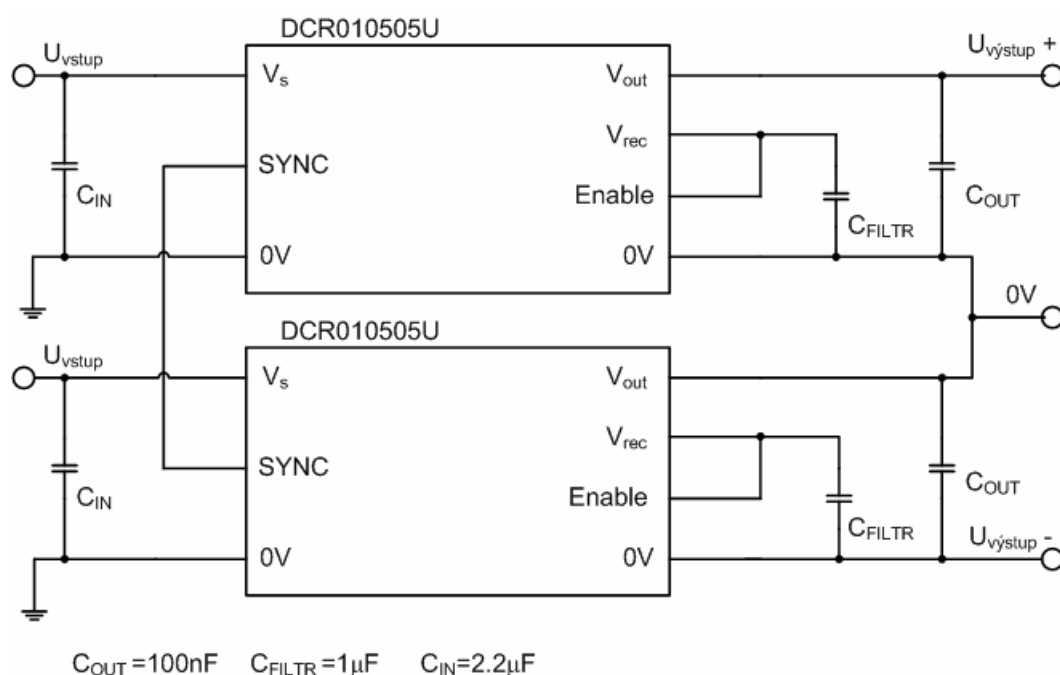
$$R = \frac{1}{2\pi \cdot 33 \cdot 10^{-9}}$$

$$\underline{\underline{R = 482,287 \text{ k}\Omega}}$$

Výsledné hodnoty využijí v simulaci v programu OrCAD PSpice a při měření na funkčním vzorku emulátoru.

3.1.4 Napájecí blok

Memristor je ve své podstatě nevolatilní druh paměti, tedy k zapamatování a udržení svého stavu nepotřebuje napájení. Toho ovšem z principu funkce analogových součástek nelze dosáhnout. Proto pro napájení emulátoru je použito standardní USB rozhraní, které je v dnešní době dostupné téměř na každém elektronickém zařízení. Využitím tohoto trendu mohu docílit zmenšení nároků na laboratorní vybavení (nutnost externího napájecího zdroje) a tím ulehčit experimentování s budoucím zařízením. Jelikož operační zesilovače použité v mém návrhu vyžadují pro svou funkci symetrické napájení, zvolil jsem pro transformaci napětí dvojici DC-DC měničů napětí (DCR010505U) od společnosti Texas Instruments, která podle doporučeného zapojení od výrobce [10] dokáží generovat právě symetrické napětí $\pm 5 \text{ V DC}$. Schéma zapojení DC-DC měničů je zobrazeno na **obr. 19**.



Obr. 19: Schéma zapojení DC-DC měničů pro generování symetrického napětí.

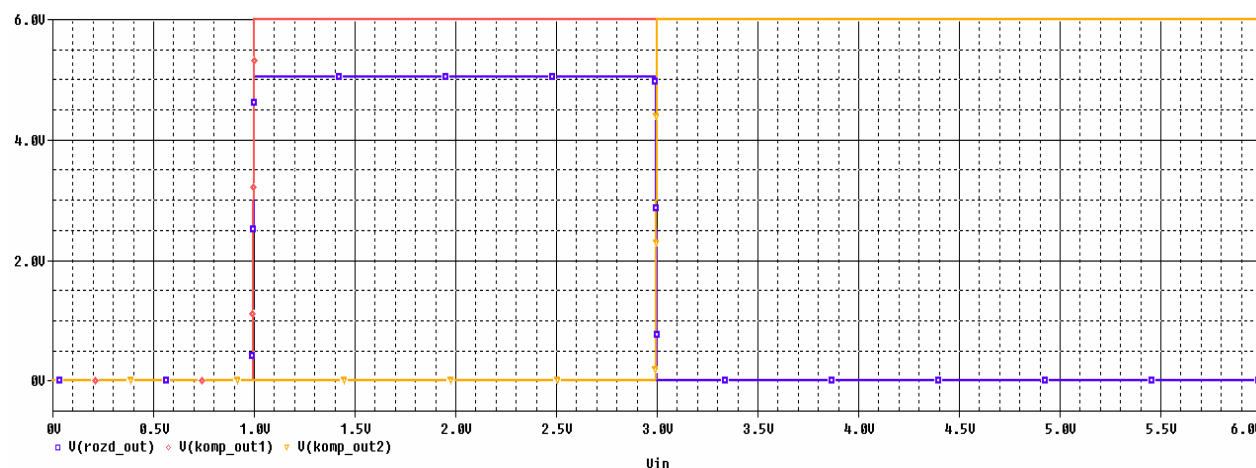
Zabudované toroidní jádro ve struktuře měniče je hlavním důvodem použití tohoto obvodu, neboť realizuje galvanické oddělení zařízení, což vychází z podmínky pro tvorbu memristoru jako plovoucího dvojpólu. Měniče mimo jiné dosahují vysoké stability výstupního napětí a nízké hodnoty výstupního šumu užitečného signálu. Výstupní výkon každého měniče činí 1 W. Při uvažování využití dvou DC-DC měničů (každý pro jednu polaritu napětí) je výstupní výkon dodávaný do zátěže $P_{OUT} = 2 \text{ W}$. USB rozhraní generace 2.0 disponuje výstupním proudem $I_{OUTMAX} = 400\text{--}500 \text{ mA}$. Výrobce měničů uvádí maximální proudovou spotřebu jednoho měniče $I_{INMAX} = 306 \text{ mA}$ při výstupním proudu měniče $I_{OUT} = 200 \text{ mA}$. Budeme-li uvažovat případ největšího výkonového vytížení, tak maximální proudový odběr obou měničů bude $I_{INDC-DC} = 612 \text{ mA}$ při výstupním proudu $I_{OUT} = 400 \text{ mA}$. Toto je skutečně limitní hranice, kterou by ovšem mělo USB rozhraní bezpečně zvládnout, viz literatura [11]. Výkonovou rozvahu uvádím jako doplněk k možné představě o energetických poměrech emulátoru a výhodě použití napětěvých měničů.

3.2 Simulace v programu OrCAD PSpice

Zapojení na **obr. 12** jsem podrobil simulacím v programu OrCAD PSpice. Modelování v tomto prostředí je velmi variabilní, blíží se reálným vlastnostem simulovaného systému a tudíž jej mohu využít jako dobrý základ pro praktickou realizaci. Netlist celého obvodu je uveden v příloze 1 na konci dokumentu.

Stejnoseměrná DC analýza

Slouží ke zjištění statických charakteristik obvodů a spočívá v opakovaném počítání stejnosměrného pracovního bodu pro různé hodnoty stejnosměrných vstupních zdrojů. Komparátorový blok plní funkci řízení odporové zátěže. Potřebuji zjistit, jsou-li skutečně dodrženy definované podmínky a při napětí větším nežli 1 resp. 3 V na referenčních vstupech bude na výstupech komparátorů kladné saturační napětí, viz **obr. 20**.

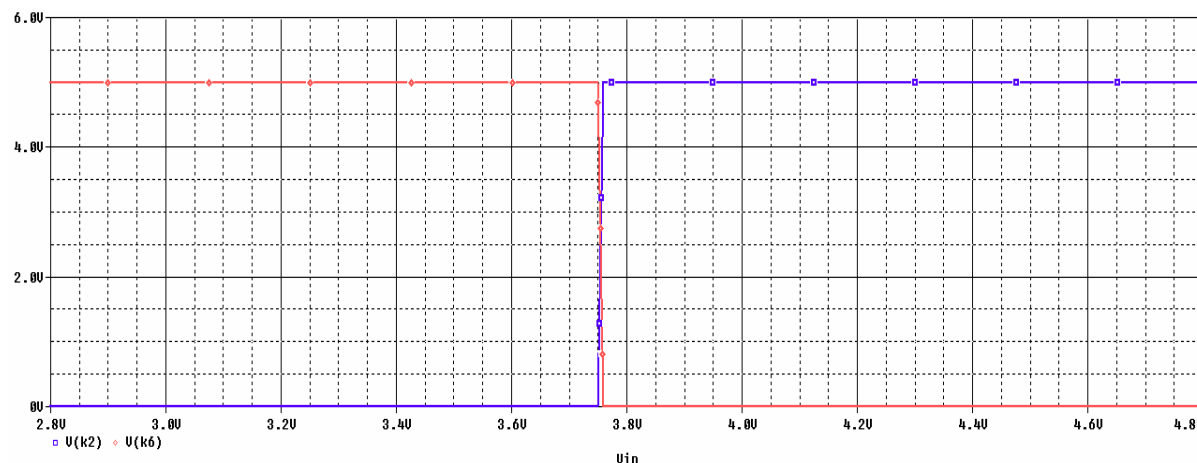


Obr. 20: Stejnoseměrná charakteristika komparátoru U_{komp1} (červená křivka), U_{komp2} (žlutá křivka) a rozdílového zesilovače U_{roz_d} (modrá křivka).

Jakmile překročí budící signál hodnotu referenčního napětí 1 V, je na výstupu komparátoru U_{komp1} kladné saturační napětí. Obdobná funkce platí i pro komparátor U_{komp2} , který má referenční napětí nastaveno na hodnotu 3 V a při překročení této meze je na výstupu kladné saturační napětí. Rozdílový zesilovač zesiluje rozdíl signálu U_{komp1} a U_{komp2} , tedy saturační napětí na výstupu rozdílového zesilovače se projeví pouze v rozmezí napětí 1 – 3 V na horizontální ose. Tímto je potvrzeno dodržení podmínky zamezení vzniku hazardních stavů, neboť na ovládací vstupy obou větví relé nemůže přijít řídicí signál současně. Protože rozdílový zesilovač AD8221 není „rail to rail“, nedosahuje stejné napěťové saturační úrovně jako komparátory AD8012, které touto vlastností disponují. Z důvodu absence SPICE modelů relé od výrobce byly vytvořeny knihovny, které přebírají hlavní udávané parametry uvedené v katalogových listech a umožňují tak provedení potřebných simulací. Součástí modelů

nejdou parazitní jevy a jedná se tak o zidealizovaný model spínače. Knihovny jsou uvedeny v příloze 2 na konci dokumentu.

Pro správné spínání relé *CRR05-1A* a *CRF05-1B* společnosti *MEDER electronic* [9] musí ovládací napětí dosahovat alespoň hodnoty 3,75 V. Zda-li tomu tak skutečně je, můžeme vidět na **obr. 21**.

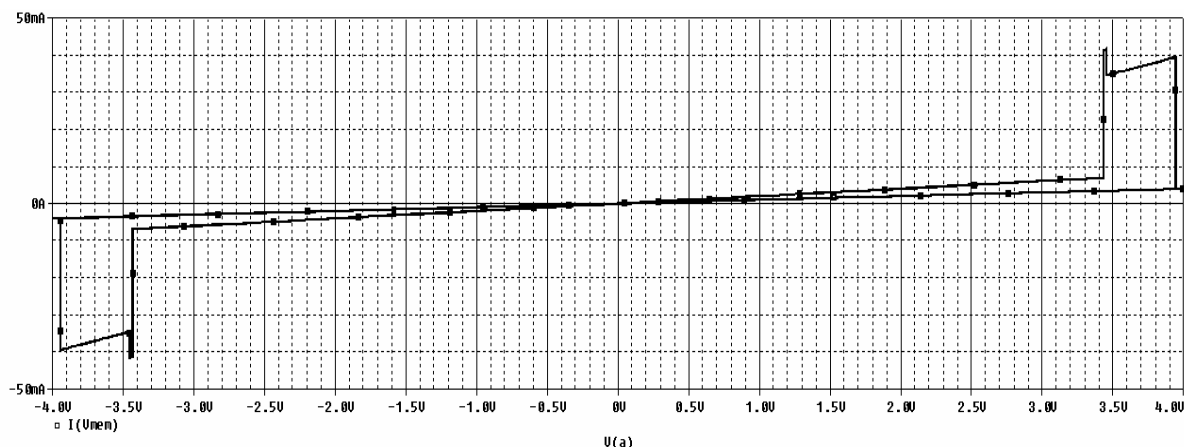


Obr. 21: Ovládání spínacího relé XS1 (modrá křivka) a rozpínacího relé XR2 (červená křivka).

Zde můžeme pozorovat spínání, resp. rozpínání kontaktů relé v závislosti na vstupním napětí U_{in} (v obrázku značeno jako V_{in}). Spínací relé XS1 je nečinné pouze do okamžiku, kdy napětí na jeho ovládací cívce přesáhne hodnotu napětí 3,75 V. V tom okamžiku se kontakty relé sepnou a odpor $R1$ je přiveden mezi uzly A, B. Pro rozpínací relé XR1 je tomu přesně naopak, neboť plní rozpínací funkci. Tedy kontakty relé jsou sepnuty při ovládacím napětí menším nežli 3,75 V. Při přesahu této hodnoty napětí se kontakty relé rozpojí a rezistor $R3$ je z odporové zátěže odpojen. Pro relé XS2 a XR2 je popis funkce totožný. Je třeba zmínit, že relé jsou spínací, respektive rozpínací, nikoliv však přepínací. Při odeznění budícího pulzu se kontakty relé vrací do základního stavu samočinně, tedy nepotřebují pro změnu svého stavu napětí opačné polarity.

Transientní analýza

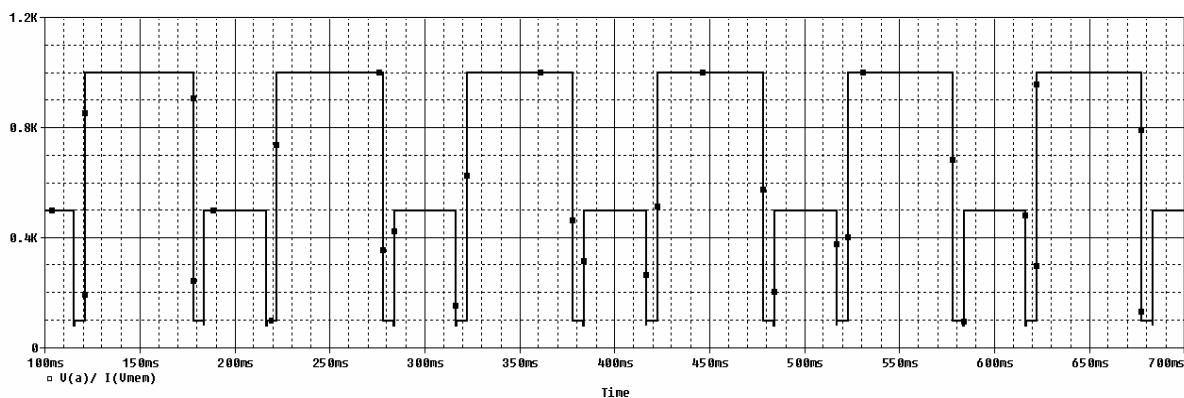
Jedná-li se o memristivní systém poznáme z jeho hysterezní smyčky. Tvoří ji souměrná křivka, která celá leží v prvním a třetím kvadrantu souřadnicového systému, viz **obr. 22**. Hodnoty obvodových prvků a budící signály byly zvoleny následovně: časová konstanta integračního článku $\tau=0,0159$ s, budící sinusové napětí $V(a)$ připojené mezi svorky A a B o amplitudě $U=\pm 4$ V a frekvenci $f=15$ Hz. Hodnoty rezistorů v odporové zátěži byly zvoleny $R1=100\ \Omega$, $R2=500\ \Omega$ a $R3=1\ k\Omega$.



Obr. 22: Hysterezní křivka memristoru.

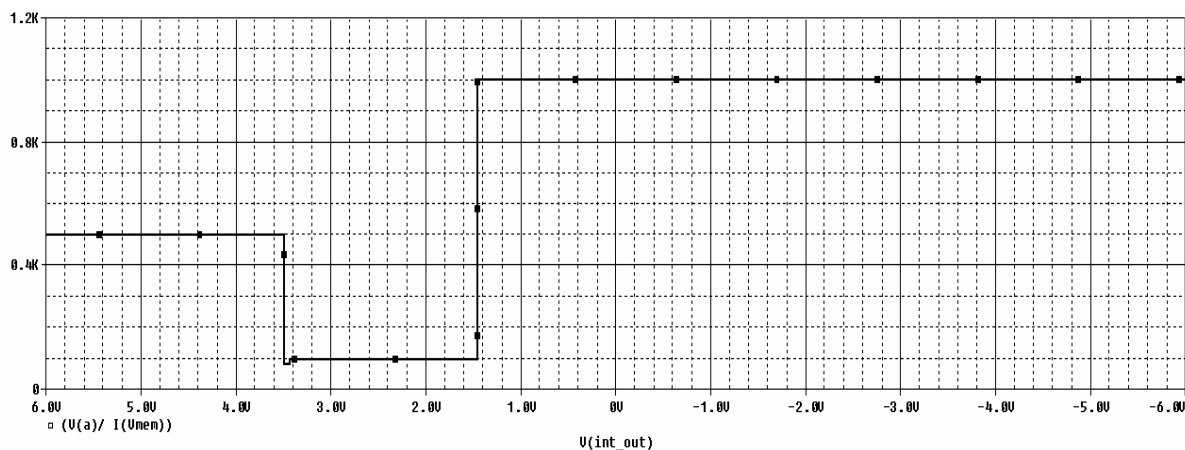
Strmost přímek odpovídá velikosti elektrického odporu, který reprezentují. Čím větší úhel svírá přímka s osou x , tím větší hodnotou odporu disponuje. Ve své podstatě se jedná o závislost napětí a proudu snímaných na vstupně-výstupních svorkách memristoru. Vstupní harmonický signál způsobí vybuzení celého obvodu. Následným snímáním proudu, který prochází odporovou zátěží, je pozorována odezva na vstupní signál. Závislost na **obr. 22** zřetelně dokazuje memristivní chování systému, neboť jeho odpor v každém bodě grafu má jinou směrnici přímky. Z toho vyplývající odpor memristoru $R(t)$ je závislý nejen na okamžitém stavu systému, ale i na kompletní minulosti, která tomuto stavu předcházela.

Jako další graf uvedu závislost elektrického odporu na čase, při buzení totožným periodickým signálem jako v předchozím případě. Na svislou osu vynáším podíl napětí U_{mem} a proudu I_{mem} procházející odporovou zátěží. Podle Ohmova zákona tak znázorním velikost odporu měnící se v čase, jak lze pozorovat na **obr. 23**.



Obr. 23: Závislost odporu memristoru na čase při buzení periodickým signálem.

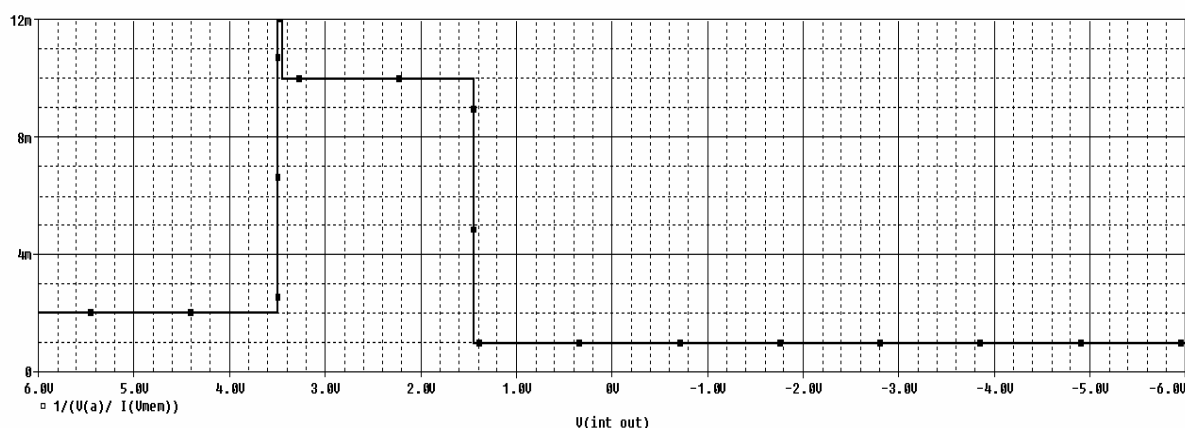
Abych navázal na správné modelování memristoru, kterým se zabývá ve své publikaci [6] prof. Leon Chua, zobrazím závislost elektrického odporu na elektrickém toku, viz **obr. 24**.



Obr. 24: Závislost odporu memristoru na toku.

Tokem se myslí zintegrované napětí vynášené z výstupu integrátoru (na obrázku značeno jako $V(int_out)$).

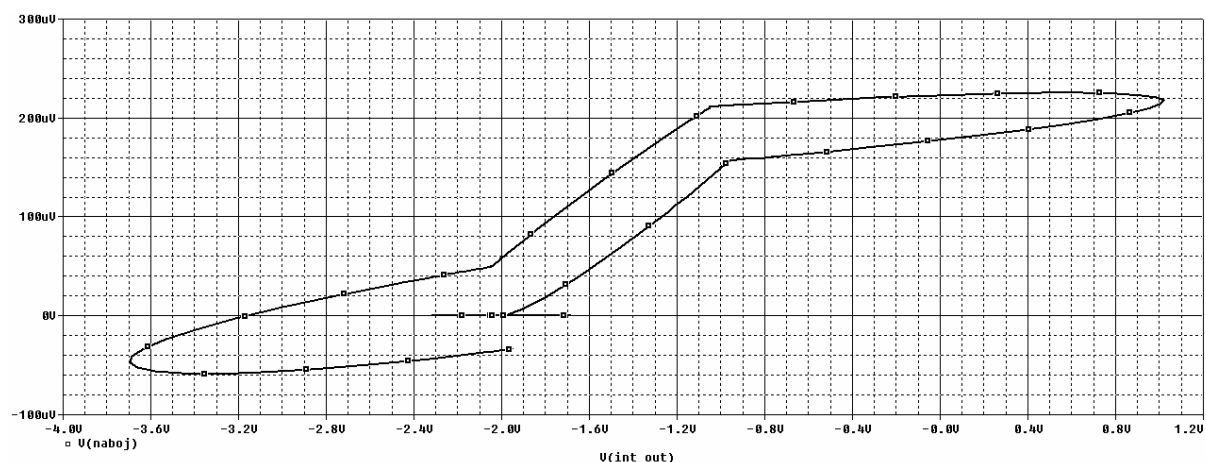
Reciproká hodnota odporu, neboli vodivost G , je zobrazena na **obr. 25**. Snažím se tak dosáhnout ideální charakteristiky, která je zobrazena na **obr. 10b**.



Obr. 25: Závislost vodivosti memristoru na toku.

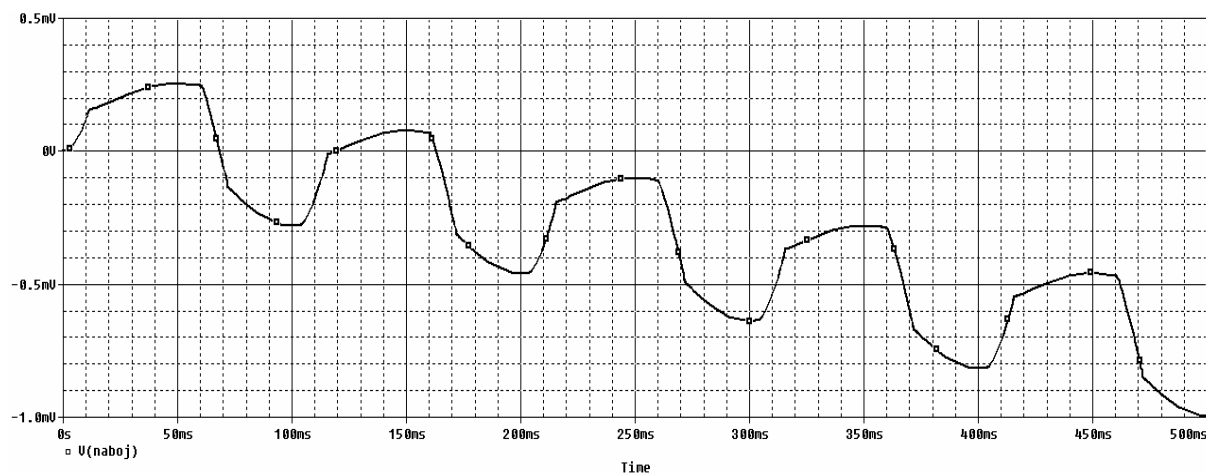
Tyto grafy dokazují správnou funkci simulace memristoru s PWL charakteristikou, neboť se shodují s předpokládanou charakteristikou na **obr. 10b**.

Další důležitá charakteristika je závislost elektrického náboje q na toku φ , která je jednoznačnou konstituční relací memristoru. Skládá se z přímk, přičemž každá z nich má svou jedinečnou směrnici, viz **obr. 26**. Pro získání toku vynáším zintegrované napětí (tok) z výstupu zabudovaného integrátoru. Na svislou osu vynáším integrovaný elektrický proud i , tedy elektrický náboj q , získaný z výstupu odporové zátěže.



Obr. 26: Po částech lineární (PWL) charakteristika emulátoru memristoru.

Výše uvedený graf vykazuje velkou shodu mezi teoretickým předpokladem uvedeným v kapitole (3). Odchylka od ideálního průběhu spočívá v ovlivňování výstupu odporové zátěže vstupem přístrojového (oddělovacího) zesilovače. Při snímání a integraci proudu, který prochází odporovou zátěží, dochází k jeho offsetu a díky tomu má náboj nenulovou střední hodnotu a tato nesymetrie neustále narůstá. V grafu na **obr. 26** se tento jev projevuje zdvojováním a posouváním PWL charakteristiky vertikálním směrem. Na **obr. 27** je zobrazen průběh elektrického náboje v čase s popsáním parazitním jevem.

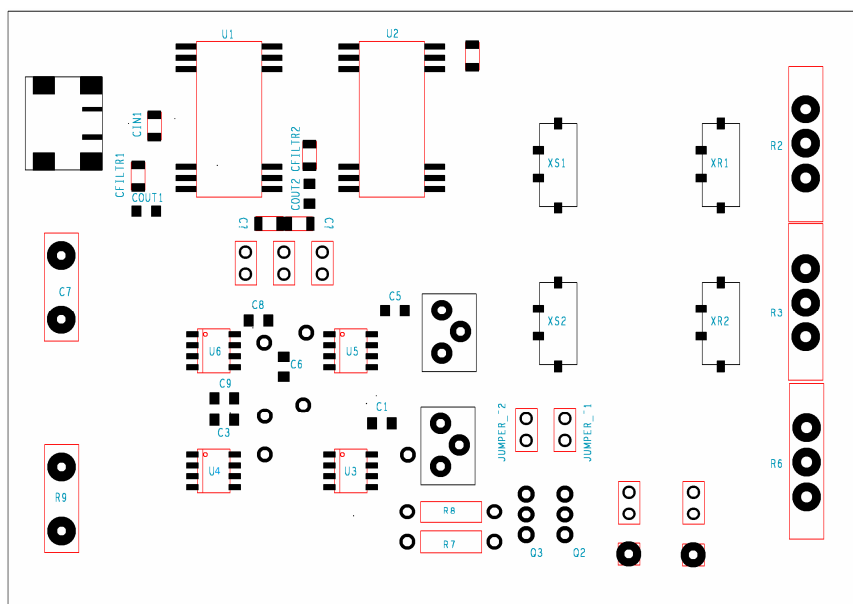


Obr. 27: Ovlivnění snímaného náboje vstupem přístrojového zesilovače.

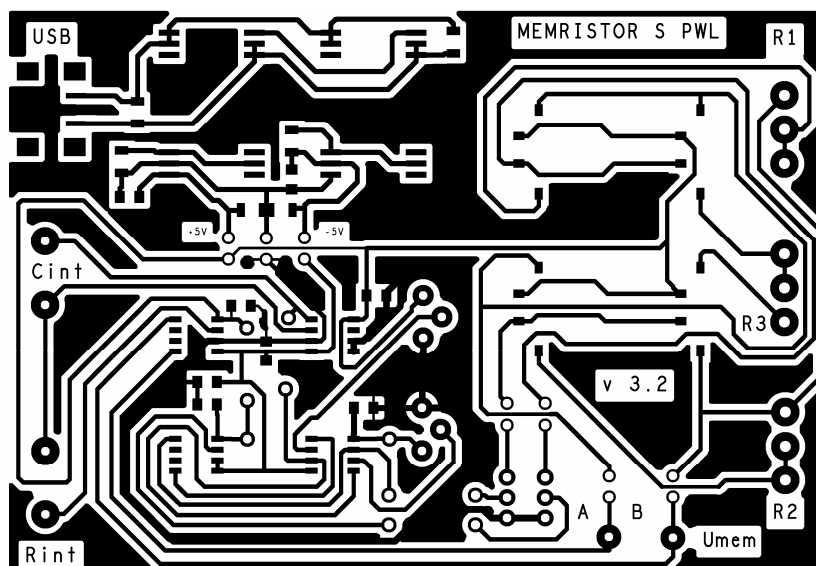
Tento systematický, neustále narůstající offset nešel v simulaci nikterak ovlivnit. Proto se domnívám, že se jedná o chybu některého z modelů operačního zesilovače, případně cyklicky se přičítající chybu výpočtu ustáleného stavu. V praktické realizaci se tato skutečnost nepotvrdila.

3.3 Praktická realizace

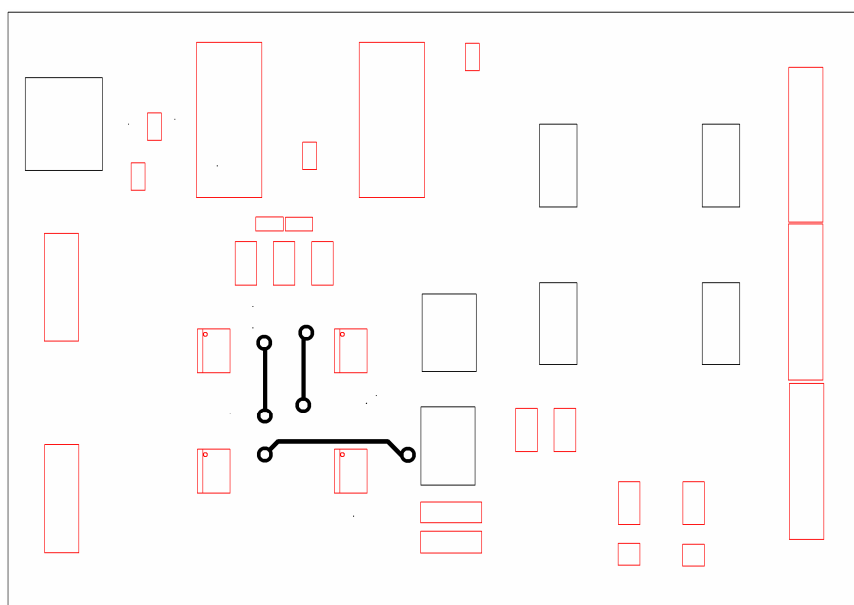
Po nastudování problematiky a ověření funkce zařízení v simulačním prostředí PSpice, jsem přistoupil k fyzické realizaci memristoru. Celý proces návrhu jsem směřoval k co nejjednoduššímu možnému řešení podoby obvodu tak, aby byla zaručena jeho spolehlivá funkce. Pomocí návrhového prostředí OrCAD PCB Designer jsem vytvořil několik návrhů podoby memristoru. V práci uvádím pouze ten s nejlepšími výsledky. Požadavky na zařízení jsou následující. Memristor se jako takový musí chovat jako autonomní plovoucí dvojpol, jehož napájení bude realizováno za pomoci DC-DC měničů, jenž bude napájet standardní USB rozhraní. Je požadována variabilita emulátoru, zejména z uživatelského pohledu. Tím je myšlena možná změna frekvenčního rozsahu, ve kterém bude paměť pracovat. S tím úzce souvisí možnost změny časové konstanty integrátoru, jenž realizuje přeměnu elektrického napětí v tok, který řídí stav paměti. Dále možnost korekce referenčního napětí komparátorů a s tím spojená změna rozhodovacích úrovní řídicí logiky. Rezistory v odporové zátěži, jež jsou spínány pomocí relé, jsou na DPS nahrazeny potenciometry pro efektivní změnu odporu memristoru a tím umožnění modelování křivek v reálném čase. Dále musí být možnost sledovat funkci jednotlivých bloků pomocí běžných laboratorních pomůcek. Důležité je i možné odpojení jednotlivých funkčních bloků od sebe navzájem, jak pro kontrolu správné funkce, tak i pro možnost ladění obvodu v případě funkce nesprávné. Z technologicko-výrobního pohledu byl celý návrh minimalizován na jednostrannou desku plošných spojů s použitím součástek pro povrchovou montáž (dále jen SMD), několika vývodových součástek a nezbytnými testovacími body pro připojení sondy osciloskopu. Předlohy pro výrobu desky plošného spoje (dále jen DPS) jsem předal kolegovi Ondreji Malinčkov, který se zabývá výrobou plošných spojů. Nebylo tedy zapotřebí zadávat výrobu profesionálním firmám a bylo tak docíleno značné minimalizace výrobních nákladů při současném udržení vysoké kvality návrhu. Součástí DPS je i nepájivá maska, což je v neprofesionálních podmínkách poměrně vzácné. Osazovací plán DPS je uveden na **obr. 28**.



Obr. 28: Osazovací plán jednostranné DPS memristoru (vrstva TOP).



Obr. 29: Návrh vodivých cest jednostranné DPS (vrstva TOP).



Obr. 30: Návrh vodivých cest jednostranné DPS (vrstva BOTTOM).

3.3.1 Elektronické součásti

Celou DPS jsem od počátku konstruoval jako jednostrannou desku s využitím součástek pro povrchovou montáž z důvodu její minimalizace. Bohužel se nepodařilo pospojovat návrh tak, aby obsahoval pouze vrstvu TOP, proto bylo nutno umístit trojici drátových propojek na spodní vrstvu desky (BOTTOM) k docílení fyzického propojení všech součástí, viz **obr. 30**. Fotografie neosazené a osazené DPS společně s trojrozměrnou vizualizací v programu OrCAD Allegro uvádím v příloze 3, 4 a 5.

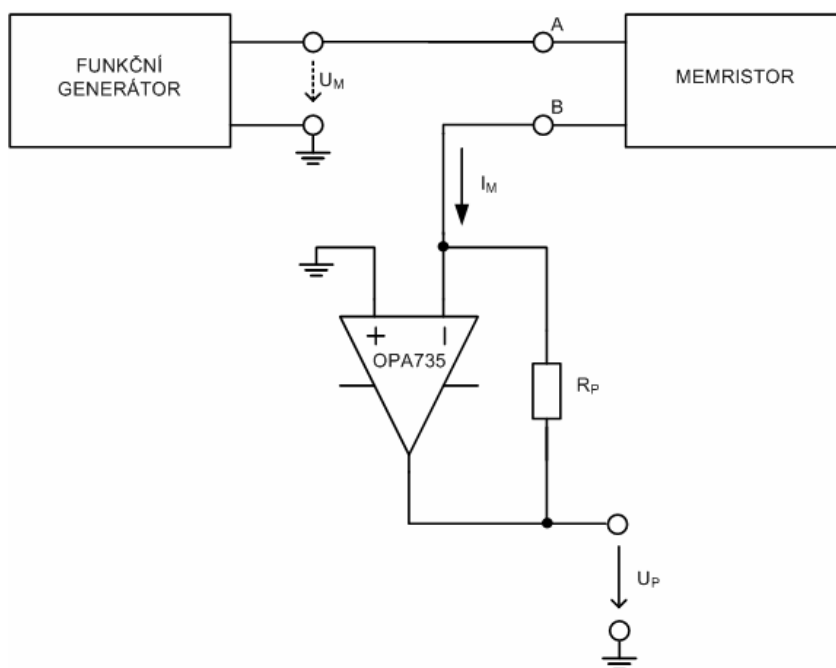
DC-DC měniče výrobce dodává v mnoha typech provedení pouzdra. Pro můj návrh se nejlépe hodilo pouzdro *SOP 12*. Operační a přístrojové zesilovače jsou uloženy do pouzdra

typu *SOIC* 8. Relé byly dodány výrobcem v pouzdru zvaném *Non-BGA* určené pro vícero technik povrchové montáže. Pro oddělení jednotlivých funkčních bloků k docílení snadného oživování a možnou kontrolu obvodu bylo použito oboustranných kolíků se zkratovacími propojkami, též známými jako *jumperry*. Pro variabilní změnu časové konstanty integračního článku jsem použil *SIL* dutinky jako zástrčné kontakty, které zajišťují dobré uchycení vývodových součástek a slouží také jako body pro připojení měřících sond osciloskopu. Pomocí trimrů s vertikálním provedením osy lze korigovat velikost referenčního napětí a tím regulovat střihu řídicích pulsů. Jako proudové posílení výstupu řídicí logiky bylo použito tranzistorů *BC547A* v pouzdře *TO-92*. Omezovací rezistory R_{T1} a R_{T2} jsem kvůli momentální dostupnosti volil v axiálním provedení. Rezistory v odporové zátěži spínané pomocí relé jsou nahrazeny potenciometry, z důvodů uvedených v kapitole (3.3). Pro přívod napájení k DC-DC měničům byl použit konektor *USB Mini B* určený pro povrchovou montáž. Pasivní součástky, v tomto případě myšleno blokovací kondenzátory, mají rozměry *SMD* 0805 (keramické) a velikost *A* (tantalové).

3.3.2 Převod proudu operačním zesilovačem OPA735

Pro vynesení hysterezních smyček je zapotřebí snímat proud protékající zátěží v závislosti na napětí na vstupně výstupních svorkách memristoru. Pro tuto funkci byl použit převodník proud-napětí s operačním zesilovačem *OPA735*, viz **obr. 31**.

Jelikož osciloskop z principu své činnosti nedovoluje přímé zobrazení proudu bez použití proudové sondy, která přesto převádí elektrický proud na napětí, využil jsem proto jednoduchého převodníku proud-napětí s operačním zesilovačem. Metoda je v ideálním případě přesná, neboť operační zesilovač neovlivňuje velikost procházejícího proudu svými parazitními vlastnostmi. Protože výrobní tolerance rezistoru R_P může ovlivnit reálnou hodnotu proudu v řádu několika procent, použil jsem rezistor s výrobcem udávanou tolerancí $\pm 5\%$ k dosažení co nejpřesnějších výsledků.



Obr. 31: Zapojení převodníku proud-napětí s *OPA735* pro měření hysterezních smyček.

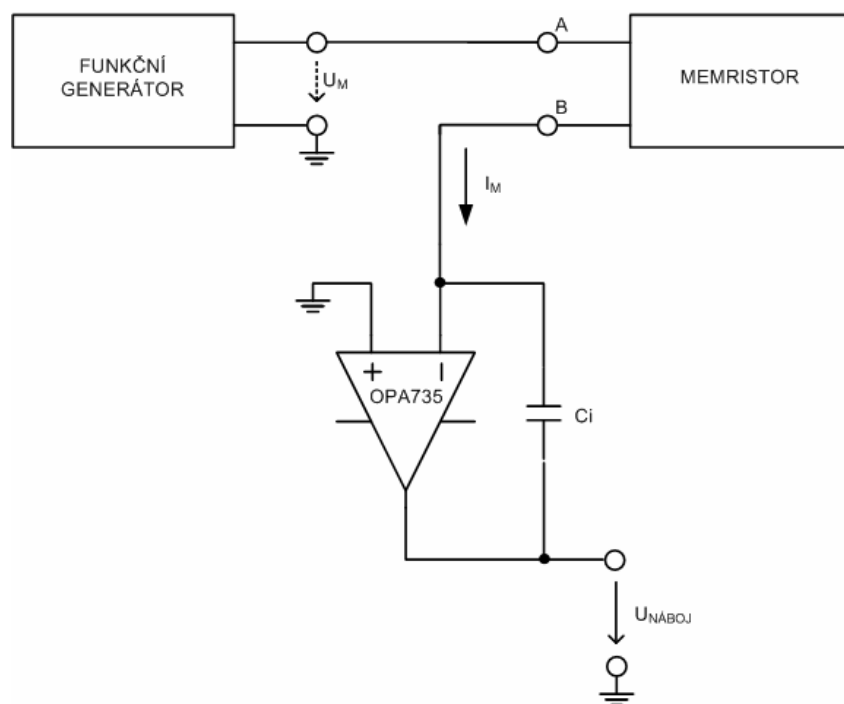
Výstupní napětí převodníku U_P je dáno vztahem,

$$U_P = k \cdot I_M \quad (20)$$

kde konstanta k značí nominální hodnotu zpětnovazebního rezistoru R_P . Výstupní napětí U_P je tedy přímo úměrné procházejícímu proudu I_M a velikosti rezistoru R_P . Takto transformovanou veličinu již lze zobrazit na stínítku osciloskopu a docílit tak hysterezní smyčky.

3.3.3 Převodník proud-náboj

Memristor řízený tokem, kterého se snažím ve své práci docílit, již ve svém obvodovém řešení obsahuje integrátor pro převod elektrického napětí na tok, a tudíž je pro funkci obvodu nepostradatelný. Převodník proud-náboj není explicitně nutný k samotné funkci memristoru, ale slouží k zobrazení PWL charakteristik. Z toho důvodu jsem vytvořil externí invertující integrační článek. Nominální hodnota kondenzátoru C_i je identická jako pro integrátor v kapitole (3.1.3). Pro rekapitulaci $C_i = 33 \text{ nF}$.



Obr. 32: Převodník proud-náboj s OPA735.

Kondenzátor C_i tvoří zpětnovazební impedanci, kterou prochází celý proud memristoru I_M , neboť do vysoko-impedančního vstupu OZ neteče žádný proud. Potom výstupní napětí převodníku U_{NABOJ} je dáno následující rovnicí.

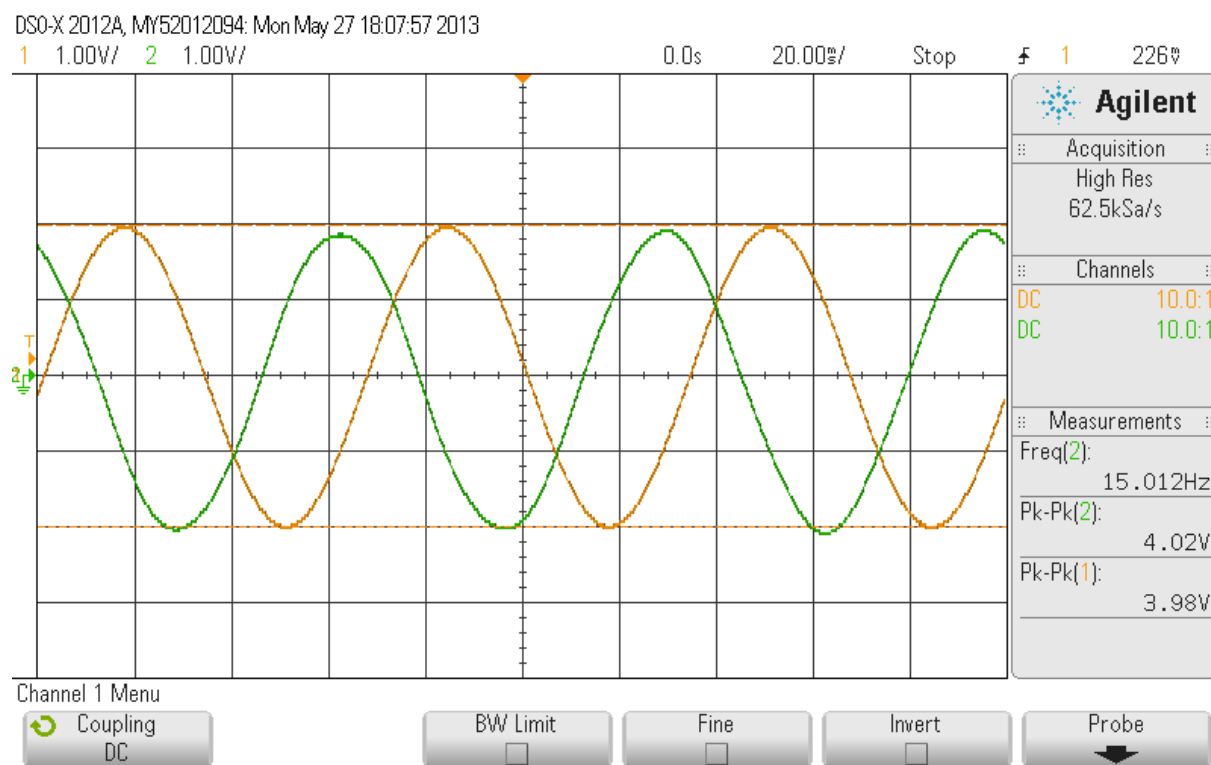
$$U_{NABOJ} = -\frac{1}{C_i} \cdot \int i_M dt \quad (21)$$

3.4 Oživení a měření na prototypu

Po vytvoření DPS a zapájení součástek jsem jednotlivé části emulátoru oživil pomocí digitálního osciloskopu *Agilent InfiniiVision 2000X*. Díky vestavěnému USB rozhraní bylo možné ukládat výsledky měření z osciloskopu na paměťové médium v grafickém formátu. Bohužel v režimu XY se snímky nedaly pořádit přímo. Proto jsem data exportoval do textové podoby, zobrazil v programu PSpice a jejich autentičnost potvrdil pořízenou fotografií.

Možnost odpojení jednotlivých funkčních bloků od okolních obvodů se ukázala jako velmi efektivní při ožívování obvodu.

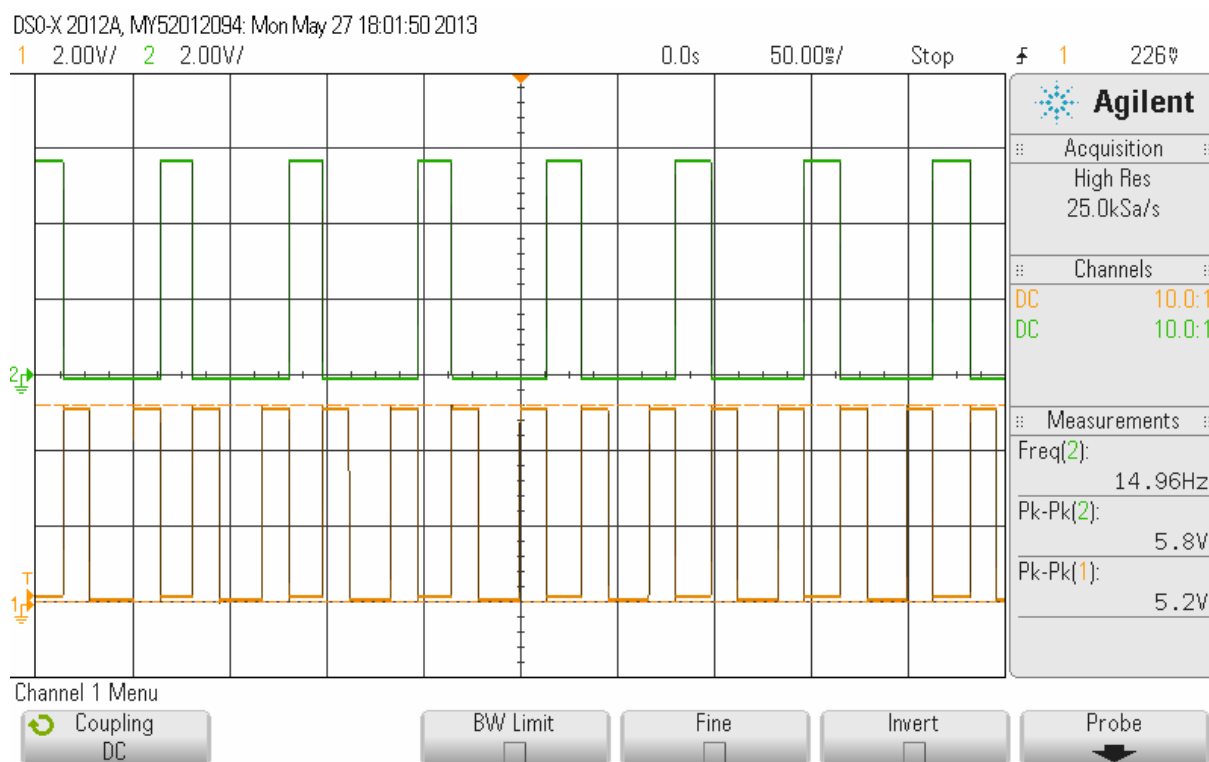
Všechna uvedená měření byla provedena při stejné frekvenci $f=15\text{ Hz}$ a amplitudě $U_{mem}=4\text{ V}$ budícího harmonického signálu. Na **obr. 33** je zobrazen změřený výstupní průběh napětí integrátoru U_{int} ve srovnání s budícím vstupním signálem U_{mem} .



Obr. 33: Výstupní průběh napětí integrátoru (žlutý průběh) v porovnání se vstupním budícím signálem (zelený průběh).

Zobrazený graf dokazuje správnou funkci integračního článku jako převodníku napětí-tok, kdy při frekvenci 15 Hz je přenos $A_u=1$, jak bylo požadováno. Tento provedený časový integrál napětí se ve výsledku projeví vzájemným fázovým posuvem výstupní veličiny o 90° . Hodnoty pasivních prvků integrátoru převzaty z kapitoly (3.3).

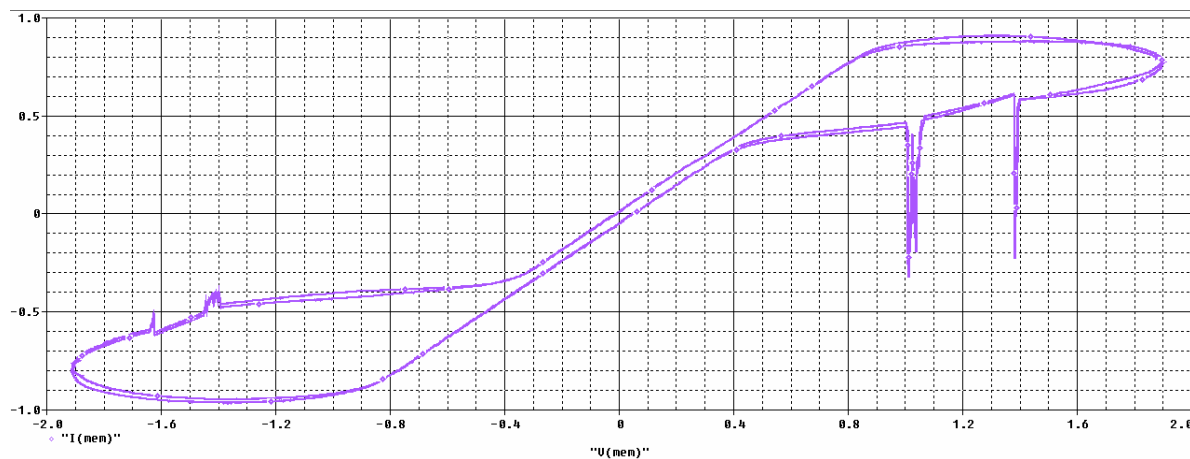
Na **obr. 34** jsou, jako důkaz správné funkce řídicí logiky, zobrazena výstupní komparační napětí U_{komp1} , U_{komp2} .



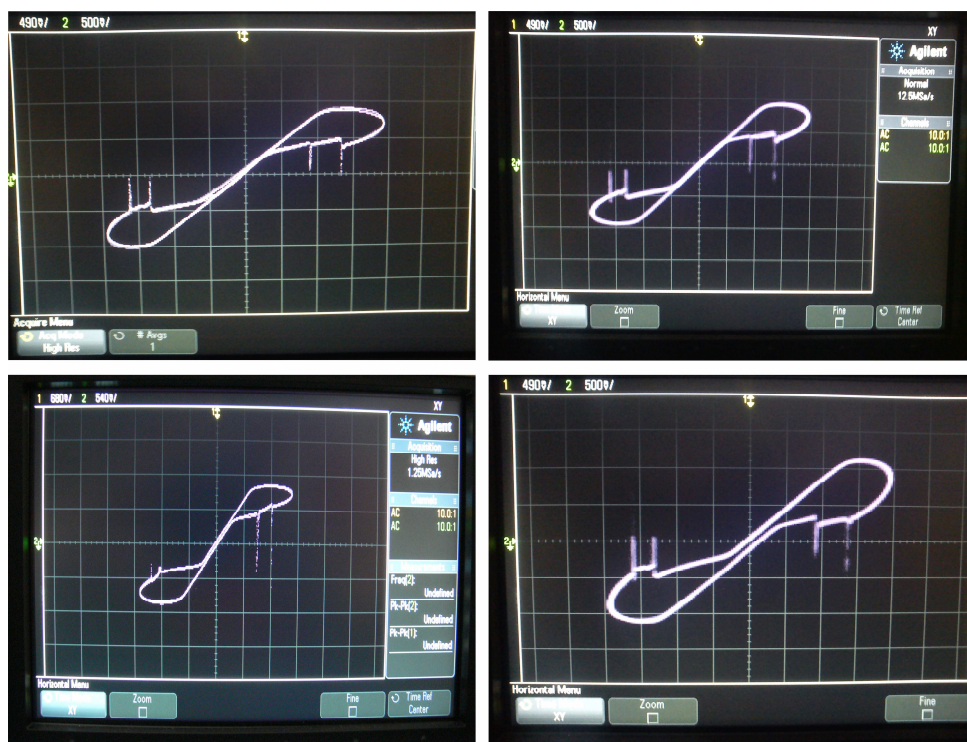
Obr. 34: Změřené výstupní napětí komparátorů v čase. U_{komp1} (žlutý průběh), U_{komp2} (zelený průběh).

Průběhy vykazují předpokládanou shodu se stejnosměrnou analýzou v simulaci na **obr. 20**, kdy přístrojový zesilovač realizuje rozdílovou funkci a zamezuje tak vzniku hazardního stavu paměti. Potvrzuje se i rozdílný rozkmit výstupního napětí u AD8221 a AD8012.

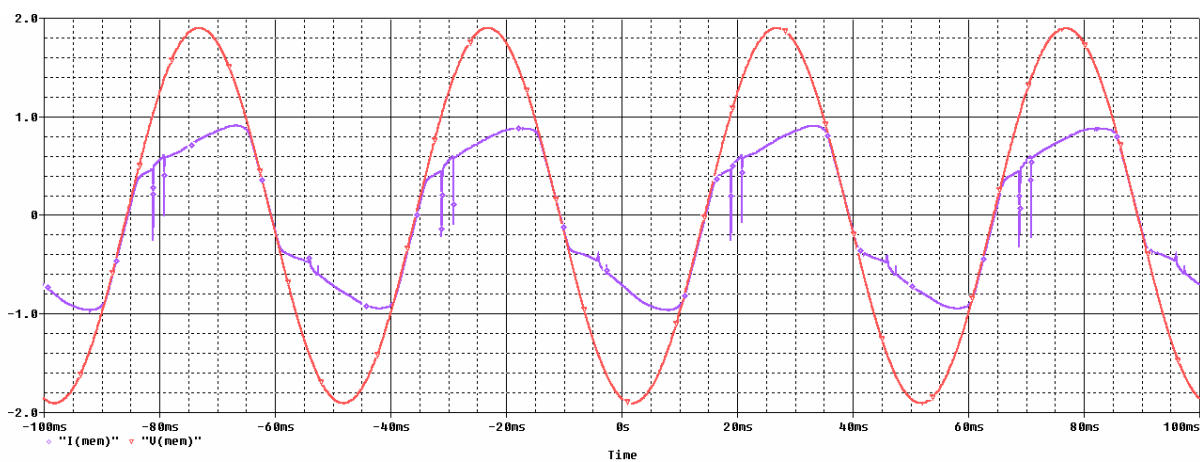
Vynesené V-A charakteristiky paměti, neboli hysterezní smyčky, jsou zobrazeny na **obr. 35** a **obr. 36**. Tyto grafy dokazují teoretický předpoklad z kapitoly (1.4) a potvrzují simulovanou činnost memristoru jako paměti z kapitoly (3.2).



Obr. 35: Změřená hysterezní smyčka memristorové paměti.



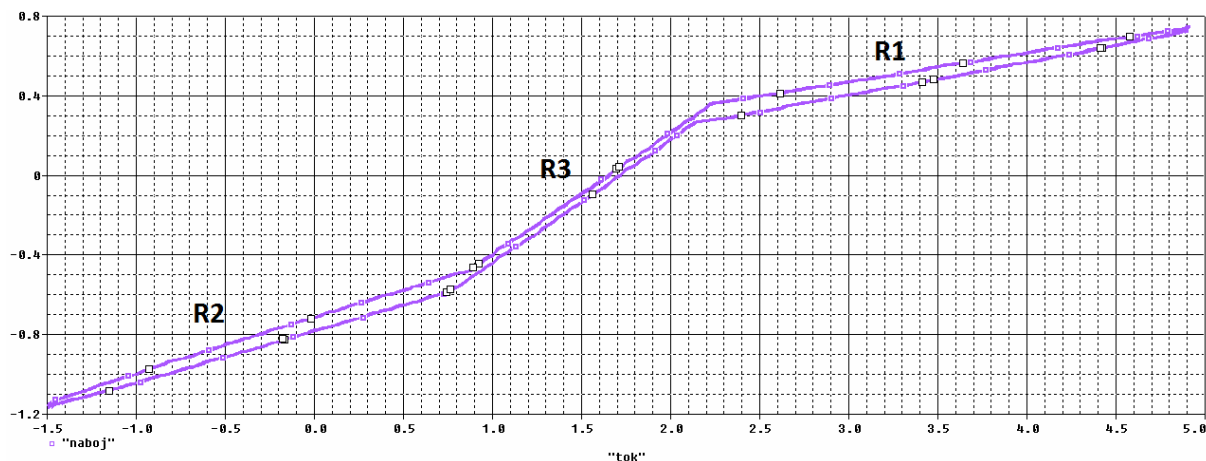
Obr. 36: Příklady změřených hysterezních smyček. Charakteristika vlevo dole odpovídá průběhu na obr.35.



Obr. 37: Změřené závislosti napětí a proudu memristoru v čase.

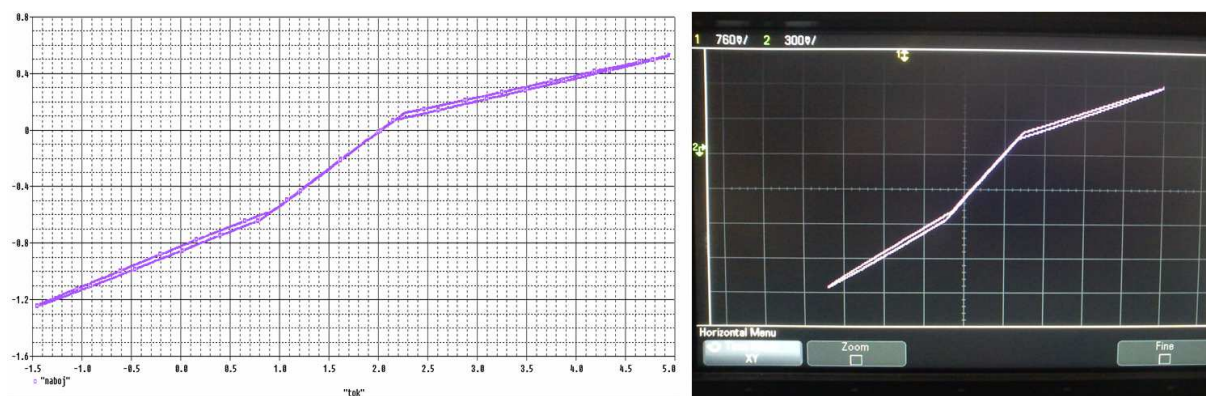
Pomocí převodníku proud-napětí jsem docílil transformaci této veličiny jak je uvedeno v kapitole (3.3.2). Velikost rezistoru R_P ve zpětnovazební smyčce převodníku jsem pro snadný přepočet zvolil $100\ \Omega$. Velikost proudu memristoru I_M tedy bude podle rovnice (20) 100x menší, nežli je zobrazeno na **obr. 37** (modrá křivka). Odečtením z obrázku je amplituda proudu v reálu přibližně $20\ \text{mA}$.

Na následujících obrázcích budou dále prezentovány změřené charakteristiky typu náboj-tok. Zpracoval jsem pět měření z nichž každé je reprezentováno třemi obrázky. Průběhu vpravo na **obr. 39** odpovídá reálná charakteristika ze stínítka osciloskopu pořízená pomocí fotoaparátu, kdy je osciloskop přepnut v režimu XY. Na horizontální osu je přivedeno napětí z výstupu interního integrátoru, tedy tok φ a vertikální ose přísluší integrovaný proud z výstupu zátěže, tedy elektrický náboj q . Graf vlevo odpovídá fotografii, ovšem jedná se o data exportovaná z digitálního osciloskopu a zobrazená v prostředí programu PSpice pro možné další elektronické zpracování. Třetí obrázek zobrazuje vždy časovou závislost náboje a toku v režimu osciloskopu XT. Z obrázků je zřejmá typická změna vodivosti memristoru, realizovaná pomocí potenciometrů označených jako $R1$, $R2$ a $R3$. Důsledkem změny odporu potenciometru je zvětšení, či zmenšení sklonu dané části charakteristiky, viz ilustrační **obr. 38**. Tímto způsobem se dají modelovat charakteristiky a měnit mezní stavy paměti v reálném čase.

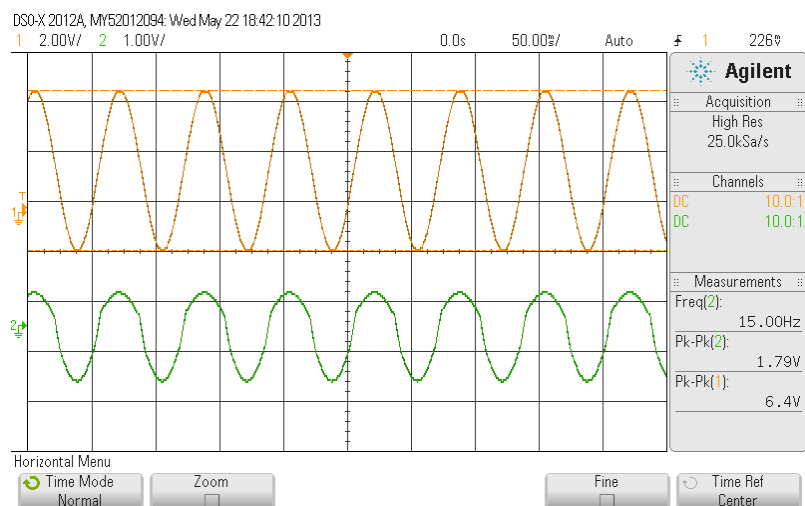


Obr. 38: Ilustrační obrázek vlivu potenciometrů na sklon částí PWL charakteristiky.

Měření č.1:

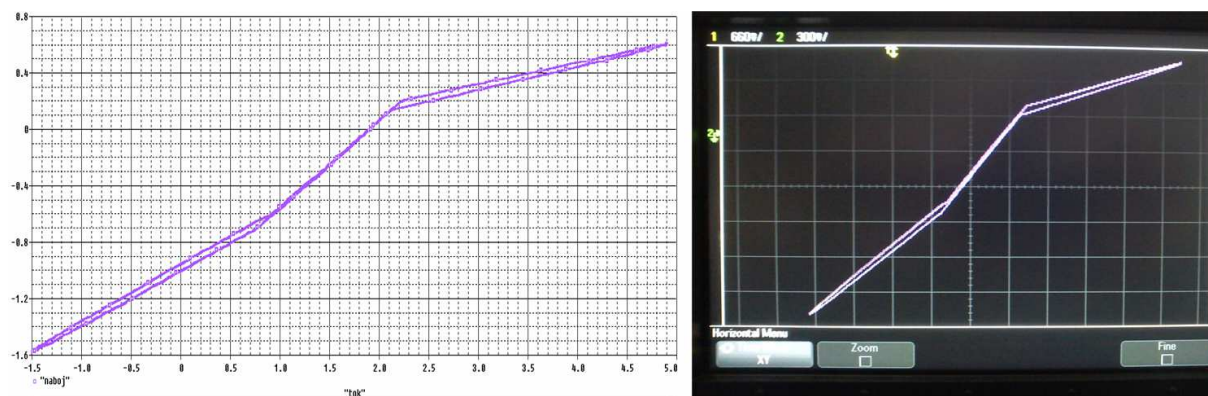


Obr. 39: PWL charakteristika č.1 ($R1=1\text{ M}\Omega$, $R2=1\text{ M}\Omega$, $R3=500\text{ k}\Omega$).

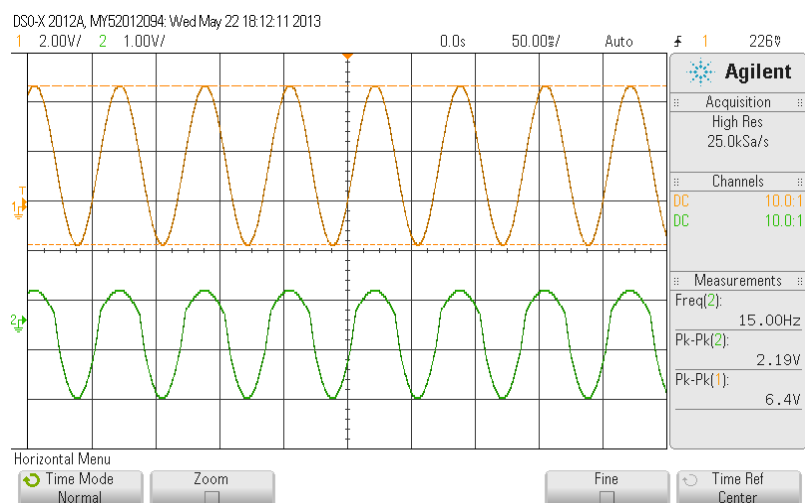


Obr. 40: Závislost náboje (zelená křivka) a toku (žlutá křivka) na čase.

Měření č.2:

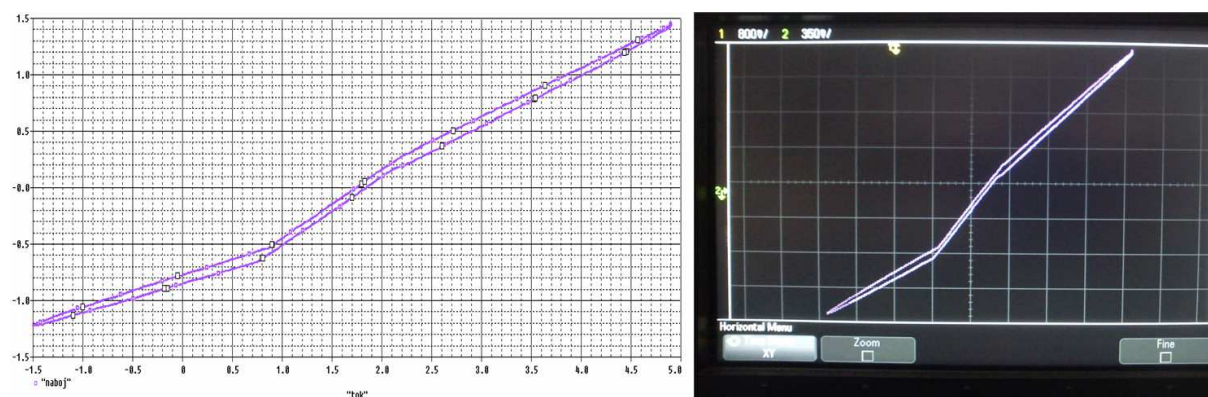


Obr. 41: PWL charakteristika č.2 ($R_1=1\text{ M}\Omega$, $R_2=750\text{ k}\Omega$, $R_3=500\text{ k}\Omega$).

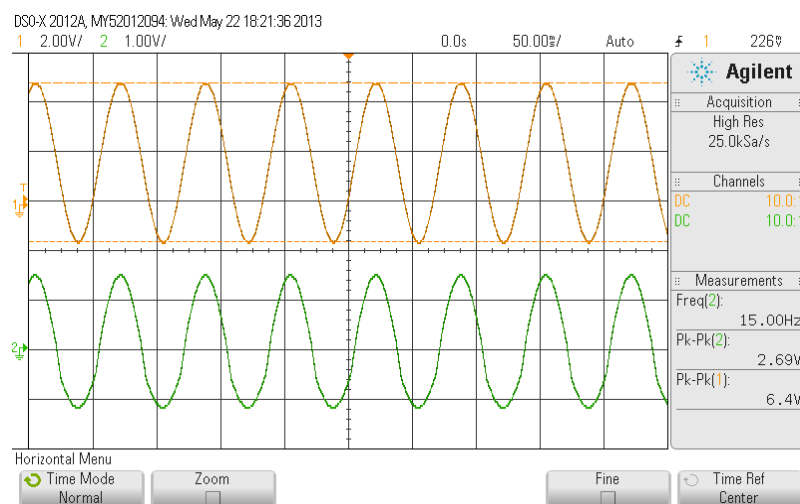


Obr. 42: Závislost náboje (zelená křivka) a toku (žlutá křivka) na čase.

Měření č.3:

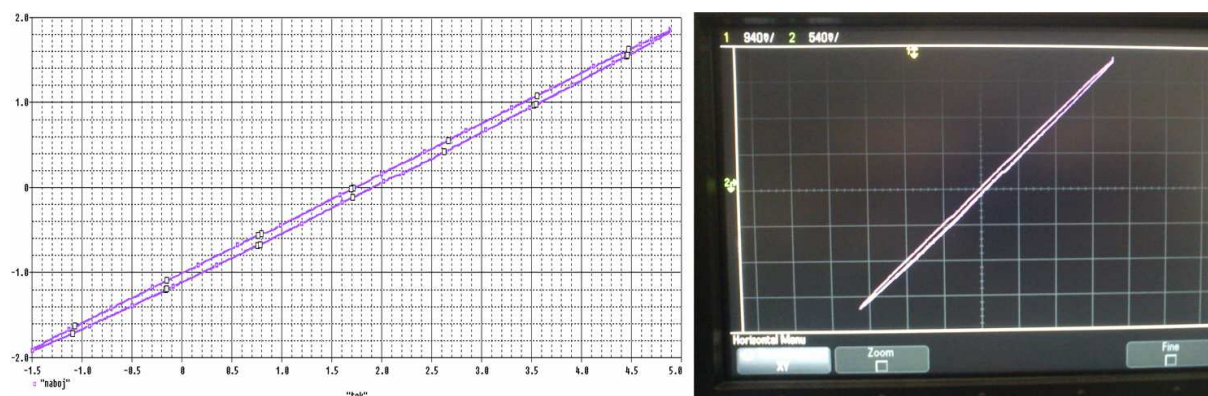


Obr. 43: PWL charakteristika č.3($R_1=100\text{ k}\Omega$, $R_2=750\text{ k}\Omega$, $R_3=500\text{ k}\Omega$).

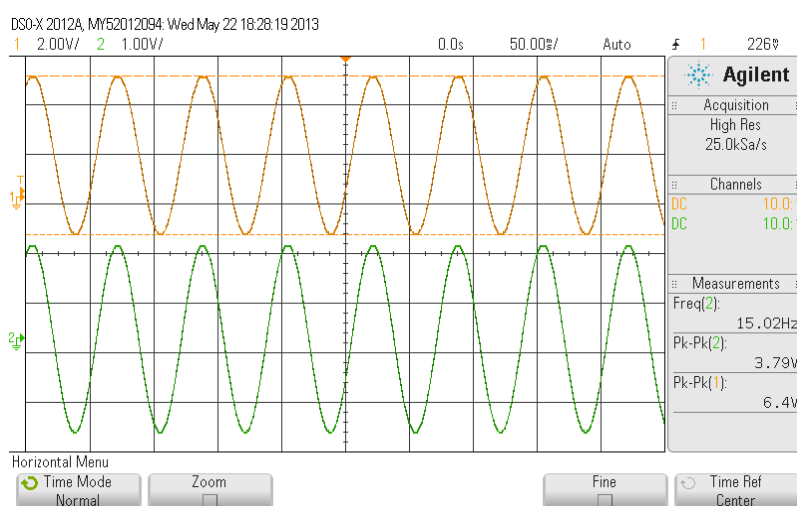


Obr. 44: Závislost náboje (zelená křivka) a toku (žlutá křivka) na čase.

Měření č.4:



Obr. 45: PWL charakteristika č.4($R_1=0\Omega$, $R_2=0\Omega$, $R_3=0\Omega$).

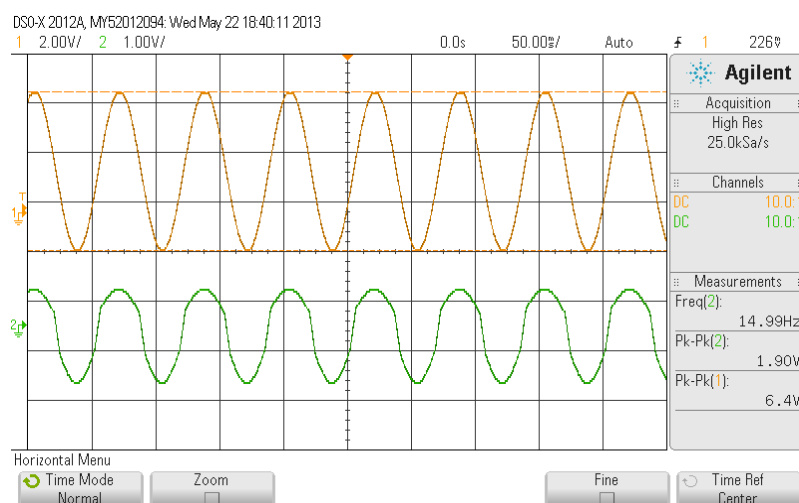


Obr. 46: Závislost náboje (zelená křivka) a toku (žlutá křivka) na čase.

Měření č.5:



Obr. 47: PWL charakteristika č.5($R_1=1\text{M}\Omega$, $R_2=1\text{M}\Omega$, $R_3=1\text{M}\Omega$).



Obr. 48: Závislost náboje (zelená křivka) a toku (žlutá křivka) na čase.

Jednotlivé charakteristiky dokazují správnou funkci memristoru jako třístavové paměti. Čím větší je vodivost paměti, tím větší je i strmost dané přímky. Přechodové jevy, které se projevují na **obr. 35** jsou pravděpodobně způsobeny nežádoucími zákmity kontaktů relé při jejich spínání, přičemž převodník proud-napětí tyto rychlé změny nedokáže s přesností interpretovat. Ze všech PWL charakteristik je patrný další nežádoucí jev a tím je offset operačních zesilovačů. Díky této napět'ové nesymetrii se průběh v rámci jedné půl periody nevrací přesně stejným bodem v rámci souřadnicové soustavy, jako v půl periodě předchozí. To sice vnáší do měření určitou míru nepřesnosti, ale neovlivňuje principiální funkci memristoru jako paměti. Tento jev nebyl v provedených simulacích patrný. Naopak co se v simulaci projevilo, ale v reálném měření nikoliv, byl uvedený systematický offset z **obr. 27**.

4 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo sestavit ucelenou rešerši dosavadních poznatků z oblasti zkoumání funkce memristoru, který se podařilo náhodou objevit v roce 2008 po 37 letech neúspěšného zkoumání. Podařilo se mi shrnout základní fakta, popsat nejdůležitější vlastnosti memristoru, navrhnout obvodové řešení a realizovat jej na desku plošných spojů.

Návrh obvodového řešení spočíval ve vhodném zvolení aktivních prvků vzhledem k jejich vlastnostem, vytvoření logiky pro spínání zátěže, zajištění jednoduchého ovládání přístroje s ohledem na celkovou proveditelnost návrhu. Obvodové řešení jsem podrobil simulacím v programu OrCAD PSpice a ověřil tak předpokládanou funkci obvodu. Mnoho SPICE modelů operačních zesilovačů od různých výrobců představovalo simulační problémy. Zejména problémy s konvergencí výpočtu. Bylo odzkoušeno množství modelů a typů zapojení, v projektu ovšem uvádím pouze ty, se kterými bylo dosaženo nejlepších výsledků. Potvrzením funkce simulacemi se návrh přesunul do fáze praktické realizace, kdy bylo vytvořeno autonomně napájené zařízení schopné potvrdit simulované výsledky.

Měřením na funkčním vzorku bylo dosaženo průběhů, které se shodují jak s teoretickým předpokladem, uvedeným v práci [6], tak i se simulovanými výsledky z prostředí PSpice. Podařilo se vynést jak hysterezní smyčku, tak po částech lineární charakteristiku a jednoznačně tak definovat memristor jako třístavovou paměť. Součástí výsledků simulací byly i parazitní jevy, které se projevíly při praktické realizaci. Napěťová nesymetrie operačních zesilovačů zasahuje do výsledků měření a projevuje se posunutím charakteristik v souřadnicové soustavě. Tím ovšem není narušena principiální funkce emulátoru memristoru. Oproti simulaci musel být fyzický návrh rozšířen o proudový posilovací stupeň v podobě bipolárních tranzistorů, aby bylo dosaženo korektního spínání odporové zátěže.

Dále byl vytvořen napájecí člen za pomoci dvou DC-DC měničů napětí. Ten z memristoru s po částech lineární charakteristikou vytváří autonomní buňku, u které sice s použitím analogových součástek nelze dosáhnout parametru nevolatility, ale je tak uživatelsky přívětivější a zmenšuje nároky na vybavení při experimentální činnosti.

V dalším pokračování práce bych chtěl navázat na dosažené výsledky. Za cíl si kladu vytvoření bloku adresovatelných memristivních buněk pro uložení informace. To bude obnášet úpravu zařízení pro dvoustavovou logiku. S tím souvisí i potřebná miniaturizace návrhu s ohledem na nízký příkon celého zařízení.

5 Seznam použitých zdrojů literatury

- [1] CHUA, L.O. Memristor – the missing circuit element. IEEE Trans. on Circuit Theory, vol. CT-18, no. 5, pp. 507 – 519, 1971.
- [2] BIOLEK, D. Memristor a jeho místo v teorii obvodů : SŠIEŘ Rožnov pod Radhoštěm. [online]. 2009, roč. 65, č. 2, s. 16 [cit. 2013-29-05]. Dostupné z: http://www.roznovskastredni.cz/biolek/articles/so09_2.pdf
- [3] BIOLEK, Z. a D. BIOLEK. Úvod do studia memristoru: SŠIEŘ Rožnov pod Radhoštěm. [online]. 2009, s. 16 [cit. 2013-29-05]. Dostupné z: <http://www.roznovskastredni.cz/dwnl/pel2009/03/biolek.pdf>
- [4] STRUKOV, Dmitri B., Gregory S. SNIDER, Duncan R. STEWART a R. Stanley WILLIAMS. The missing memristor found. [online]. 2008, s. 4 [cit. 2013-29-05]. Dostupné z: <http://inst.cs.berkeley.edu/~ee129/sp09/handouts/TheMissingMemristorFound.pdf>
- [5] CLARKE, Peter. HP, Hynix delay memristor debut. [online]. 2012 [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: <http://www.eetimes.com/electronics-news/4397188/HP-Hynix-memristor-debut-pushed-back>
- [6] CHUA, Leon. Resistance switching memories are memristors. [online]. 2011, s. 765-783, 28 January 2011 [cit. 2013-29-05]. DOI: DOI 10.1007/s00339-011-6264-9. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00339-011-6264-9?LI=true#page-1>
- [7] Katalogový list operačního zesilovače AD8012. ANALOG DEVICES. [online]. [cit. 2013-29-05]. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8012.pdf
- [8] Katalogový list přístrojového zesilovače AD8221. ANALOG DEVICES. [online]. [cit. 2012-29-05]. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8221.pdf
- [9] Katalogový list relé CRF05-1A. MEDER electronic. [online]. [cit. 2012-29-05]. Dostupné z: <http://datasheet.octopart.com/CRF05-1A-MEDER-datasheet-5376852.pdf>
- [10] Katalogový list relé DCR010505U. Texas Instruments. [online]. [cit. 2012-29-05]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dcr010505.pdf>
- [11] CALETKA, Ondřej. Půlampérový mýtus o USB. Root.cz [online]. 2013, 8. 02. 2013[cit.2013-05-29].Dostupné z: <http://oskar.blog.root.cz/2013/02/08/pulamperovy-mytus-o-usb/>

6 Přílohy

1) Vstupní soubor pro simulace v programu OrCAD PSpice:

```
Memristor s PWL charakteristikou

*BUDÍČÍ SIGNÁL
Vin a b sin 0 4V 10Hz

*NAPÁJENÍ OZ
V+ + 0 6V
V- 0 - 6V

*AD8221 JAKO PŘÍSTROJOVÝ ZESILOVAČ (ODDĚLOVAČ)
Xad8221 b 12 13 a - 0 int_in + ad8221
Rg1 12 13 1t

*INTEGRÁTOR S OZ AD8012
Xintegr 0 in- + - int_out ad8012an
Ci int_out in- 33n ic= 2
Ri int_in in- 482k

*AD8221 JAKO ROZDÍLOVÝ ZESILOVAČ
Xdifff komp_out2 50 60 komp_out1 - 0 rozd_out + ad8221
Rg2 50 60 1t

*KOMPARÁTOR 1
Xkomp1 int_out ref1 + 0 komp_out1 ad8012an
Vref1 ref1 0 1V
*KOMPARÁTOR 2
Xkomp2 int_out ref2 + 0 komp_out2 ad8012an
Vref2 ref2 0 3V

*RELÉ (SPÍNACÍ + ROZPÍNACÍ)
XS1 rozd_out 0 pom k2 CRF05 ;SPÍNACÍ RELÉ
XS2 komp_out2 0 pom k4 CRF05 ;SPÍNACÍ RELÉ
XR1 rozd_out 0 pom k6 CRR05 ;ROZPÍNACÍ RELÉ
XR2 komp_out2 0 k7 b CRR05 ;ROZPÍNACÍ RELÉ

*ODPOROVÁ ZÁTĚŽ
Rz1 k2 b 100 ;R1 100
Rz2 k4 b 500 ;R2 500
Rz3 k6 k7 1k ;R3 1k

Vmem a pom 0 ;AMPÉRMETR NA UZLU a
Eint2 naboje 0 value= {sdt(i(vmem))}
Vnazem b 0 0
.probe
.tran 0 0.3 0 10m skipbp

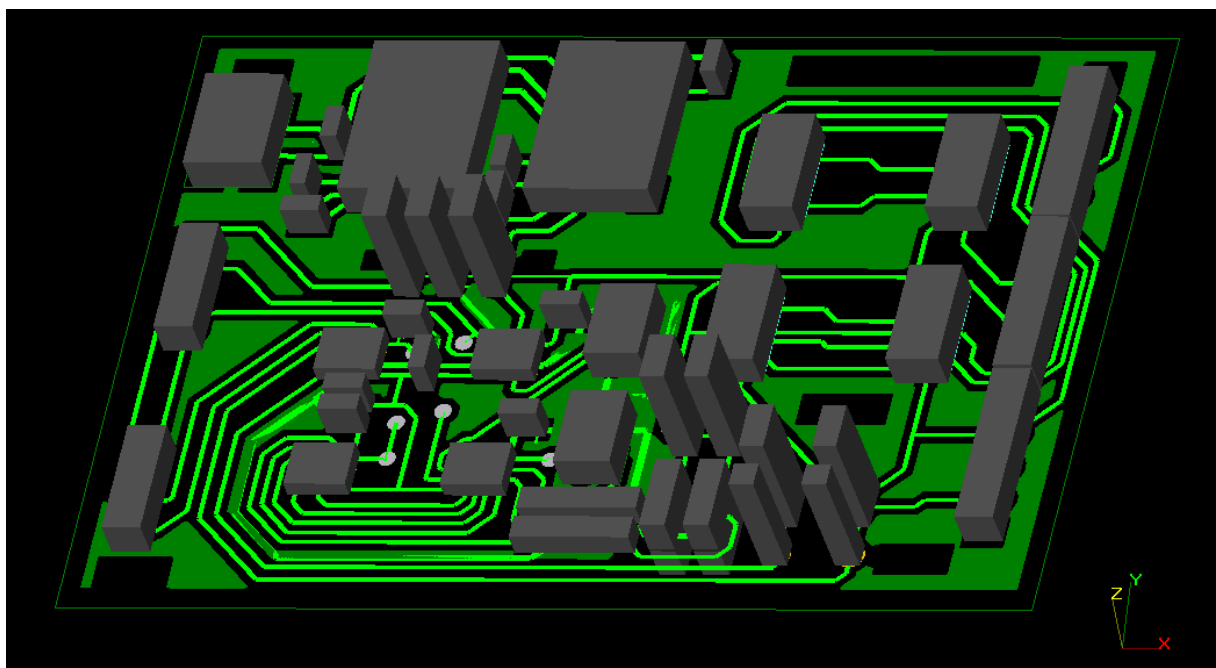
*KNIHOVNY
.lib CRF05.lib ;SPÍNACÍ RELÉ KNIHOVNA
.lib CRR05.lib ;ROZPÍNACÍ RELÉ KNIHOVNA
.lib ad8221.lib
.lib ad8012an.lib
.lib
.end
*****
```

2) SPICE modely použitých relé

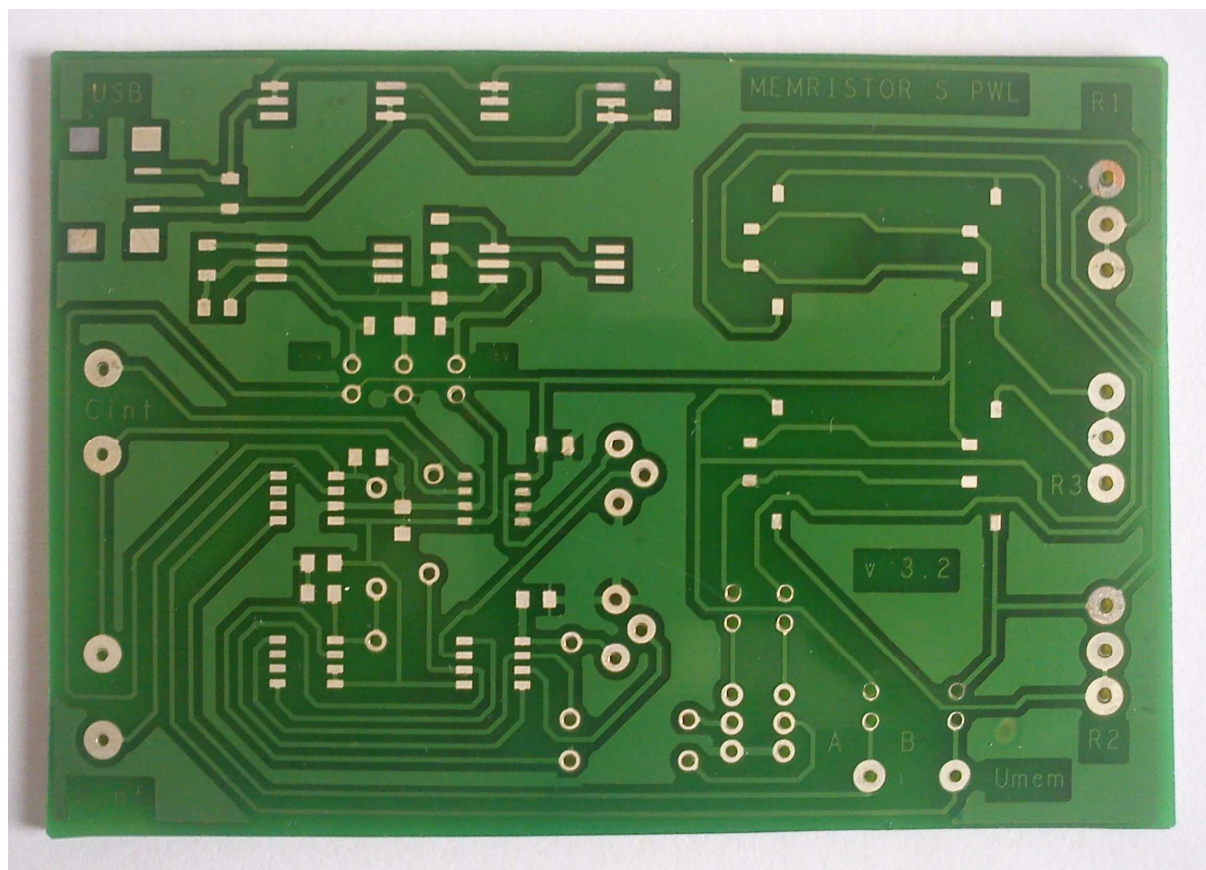
```
*ROZPÍNACÍ RELÉ CRR05-1B
.subckt CRR05 + - 1 2
Rcivky + in 150
S1 1 2 in - rozpinaci
.MODEL rozpinaci VSWITCH [Roff = 0.2 Ron = 1T Vt = 3.75 Vh = 0.7 Td
= 0.2m]
.ends
*****

*SPÍNACÍ RELÉ CRF05-1A
.subckt CRF05 + - 1 2
Rcivky + in 150
S1 1 2 in - spinaci
.MODEL spinaci VSWITCH [Roff = 1T Ron = 0.2 Vt = 3.75 Vh = 0.7 Td =
0.2m]
.ends
*****
```

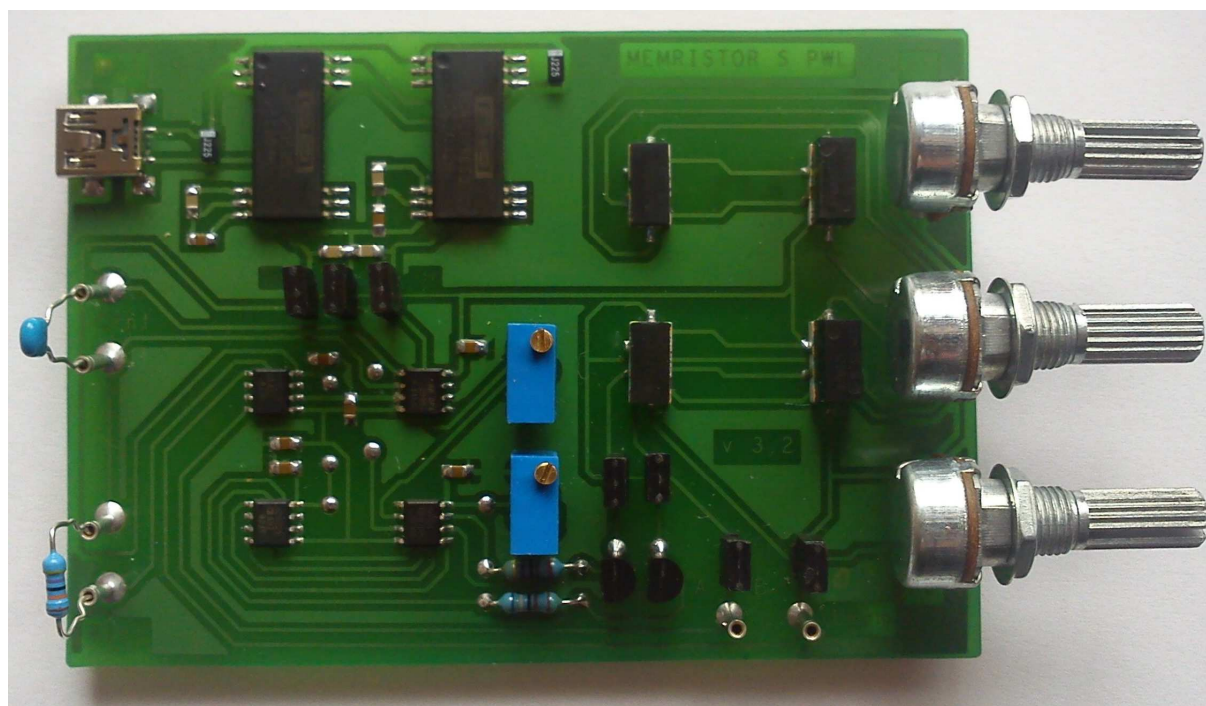
3) Vizualizace v programu OrCAD Allegro

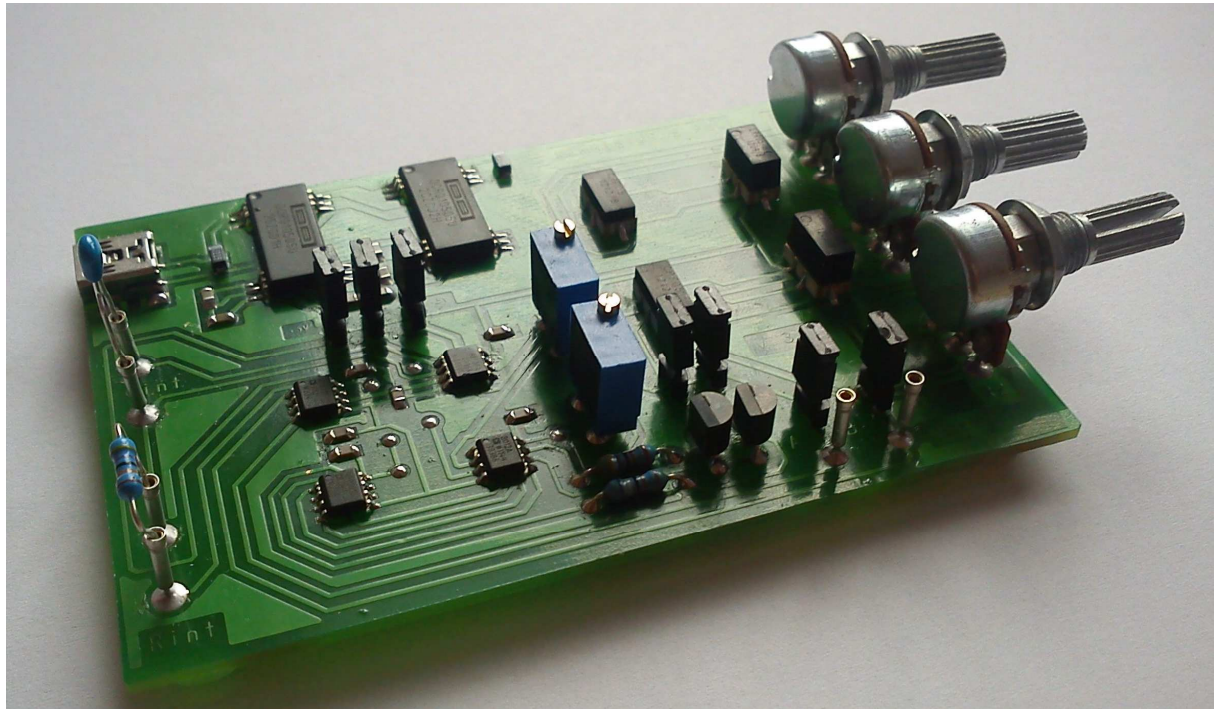


4) Fotografie neosazené DPS



5) Fotografie osazené DPS





- 6) Kompletní schéma zapojení memristoru s PWL v programu OrCAD Capture

Samostatný list velikosti A3.

7 Seznam obrázků

OBR. 1: ZÁKLADNÍ OBVODOVÉ PRVKY A JEJICH VZÁJEMNÉ RELACE. PŘEKRESLENO Z[2]	- 8 -
OBR. 2: SCHÉMATICKÁ ZNAČKA MEMRISTORU.	- 8 -
OBR. 3: KONSTITUČNÍ RELACE MEMRISTORU [2].	- 9 -
OBR. 4: HYDROMECHANICKÝ MODEL MEMRISTORU. A) R_{ON} MINIMÁLNÍ HODNOTA ODPORU, B) R_{MID} STŘEDNÍ HODNOTA ODPORU, C) R_{OFF} MAXIMÁLNÍ HODNOTA ODPORU [3].	- 10 -
OBR. 5: POLOVODIČOVÝ MODEL MEMRISTORU HP. PŘEKRESLENO Z [2].	- 12 -
OBR. 6: STRUKTURÁLNÍ SCHÉMA MEMRISTORU [2].	- 12 -
OBR. 7: V-A CHARAKTERISTIKY (A) LINEÁRNÍ REZISTOR, (B) NELINEÁRNÍ REZISTOR, (C) MEMRISTOR [3].	- 14 -
OBR. 8: CHARAKTERISTIKY MEMRISTORU PRO KMITOČTY A) 1Hz, B) 10Hz [2].	- 14 -
OBR. 9: MATICOVÁ STRUKTURA MEMRISTOROVÉ PAMĚTI. PŘEKRESLENO Z [2]	- 15 -
OBR. 10: A) PWL CHARAKTERISTIKA, B) ODPOVÍDAJÍCÍ VELIKOST ODPORU. PŘEKRESLENO Z [6].	- 16 -
OBR. 11: BLOKOVÉ SCHÉMA MEMRISTOROVÉ PAMĚTI.	- 18 -
OBR. 12: KOMPLETNÍ OBVODOVÉ ŘEŠENÍ EMULÁTORU MEMRISTORU.	- 18 -
OBR. 13: ZAPOJENÍ ODPOROVÉ ZÁTĚŽE SE SPÍNACÍMI A ROZPÍNACÍMI RELÉ.	- 19 -
OBR. 14: OBVODOVÉ SCHÉMA ŘÍDÍCÍ LOGIKY.	- 20 -
OBR. 15: A) VÝSTUPY KOMPARÁTORU U_{KOMP1} , U_{KOMP2} ; B) ROZDÍL SIGNÁLŮ U_{KOMP1} A U_{KOMP2} .	- 21 -
OBR. 16: SCHÉMA PROUDOVÉHO POSÍLENÍ VÝSTUPU KOMPARÁTORU.	- 22 -
OBR. 17: ZJEDNODUŠENÉ VNITŘNÍ SCHÉMA PŘÍSTROJOVÉHO ZESILOVAČE AD8221 SPOLEČNOSTI ANALOG DEVICES (NAPĚTÍ ZNAČENO V). PŘEKRESLENO Z [8].	- 24 -
OBR. 18: INTEGRAČNÍ ČLÁNEK S AD8012.	- 24 -
OBR. 19: SCHÉMA ZAPOJENÍ DC-DC MĚNIČŮ PRO GENEROVÁNÍ SYMETRICKÉHO NAPĚTÍ.	- 26 -
OBR. 20: STEJNOSMĚRNÁ CHARAKTERISTIKA KOMPARÁTORU U_{KOMP1} (ČERVENÁ KŘIVKA), U_{KOMP2} (ŽLUTÁ KŘIVKA) A ROZDÍLOVÉHO ZESILOVAČE U_{ROZD} (MODRÁ KŘIVKA).	- 27 -
OBR. 21: OVLÁDÁNÍ SPÍNACÍHO RELÉ XS1 (MODRÁ KŘIVKA) A ROZPÍNACÍHO RELÉ XR2 (ČERVENÁ KŘIVKA).	- 28 -
OBR. 22: HYSTEREZNÍ KŘIVKA MEMRISTORU.	- 29 -
OBR. 23: ZÁVISLOST ODPORU MEMRISTORU NA ČASE PŘI BUZENÍ PERIODICKÝM SIGNÁLEM.	- 29 -
OBR. 24: ZÁVISLOST ODPORU MEMRISTORU NA TOKU.	- 30 -
OBR. 25: ZÁVISLOST VODIVOSTI MEMRISTORU NA TOKU.	- 30 -
OBR. 26: PO ČÁSTECH LINEÁRNÍ (PWL) CHARAKTERISTIKA EMULÁTORU MEMRISTORU.	- 31 -
OBR. 27: OVLIVNĚNÍ SNÍMANÉHO NÁBOJE VSTUPEM PŘÍSTROJOVÉHO ZESILOVAČE.	- 31 -
OBR. 28: OSAZOVACÍ PLÁN JEDNOSTRANNÉ DPS MEMRISTORU (VRSTVA TOP).	- 32 -
OBR. 29: NÁVRH VODIVÝCH CEST JEDNOSTRANNÉ DPS (VRSTVA TOP).	- 33 -
OBR. 30: NÁVRH VODIVÝCH CEST JEDNOSTRANNÉ DPS (VRSTVA BOTTOM).	- 33 -
OBR. 31: ZAPOJENÍ PŘEVODNÍKU PROUD-NAPĚTÍ S OPA735 PRO MĚŘENÍ HYSTEREZNÍCH SMYČEK.	- 34 -
OBR. 32: PŘEVODNÍK PROUD-NÁBOJ S OPA735.	- 35 -
OBR. 33: VÝSTUPNÍ PRŮBĚH NAPĚTÍ INTEGRÁTORU (ŽLUTÝ PRŮBĚH) V POROVNÁNÍ SE VSTUPNÍM BUDÍCÍM SIGNÁLEM (ZELENÝ PRŮBĚH).	- 36 -

OBR. 34: ZMĚŘENÉ VÝSTUPNÍ NAPĚTÍ KOMPARÁTORŮ V ČASE. U_{KOMP1} (ŽLUTÝ PRŮBĚH), U_{KOMP2} (ZELENÝ PRŮBĚH). . -	
37 -	
OBR. 35: ZMĚŘENÁ HYSTEREZNÍ SMYČKA MEMRISTOROVÉ PAMĚTI.	- 37 -
OBR. 36: PŘÍKLADY ZMĚŘENÝCH HYSTEREZNÍCH SMYČEK. CHARAKTERISTIKA VLEVO DOLE ODPOVÍDÁ PRŮBĚHU NA OBR.35.	- 38 -
OBR. 37: ZMĚŘENÉ ZÁVISLOSTI NAPĚTÍ A PROUDU MEMRISTORU V ČASE.	- 38 -
OBR. 38: ILUSTRACNÍ OBRÁZEK VLIVU POTENCIOMETRŮ NA SKLON ČÁSTÍ PWL CHARAKTERISTIKY.	- 39 -
OBR. 39: PWL CHARAKTERISTIKA Č.1($R_1=1\text{ M}\Omega$, $R_2=1\text{ M}\Omega$, $R_3=500\text{ k}\Omega$).	- 39 -
OBR. 40: ZÁVISLOST NÁBOJE (ZELENÁ KŘIVKA) A TOKU (ŽLUTÁ KŘIVKA) NA ČASE.	- 40 -
OBR. 41: PWL CHARAKTERISTIKA Č.2($R_1=1\text{ M}\Omega$, $R_2=750\text{ k}\Omega$, $R_3=500\text{ k}\Omega$).	- 40 -
OBR. 42: ZÁVISLOST NÁBOJE (ZELENÁ KŘIVKA) A TOKU (ŽLUTÁ KŘIVKA) NA ČASE.	- 40 -
OBR. 43: PWL CHARAKTERISTIKA Č.3($R_1=100\text{ k}\Omega$, $R_2=750\text{ k}\Omega$, $R_3=500\text{ k}\Omega$).	- 41 -
OBR. 44: ZÁVISLOST NÁBOJE (ZELENÁ KŘIVKA) A TOKU (ŽLUTÁ KŘIVKA) NA ČASE.	- 41 -
OBR. 45: PWL CHARAKTERISTIKA Č.4($R_1=0\text{ }\Omega$, $R_2=0\text{ }\Omega$, $R_3=0\text{ }\Omega$).	- 42 -
OBR. 46: ZÁVISLOST NÁBOJE (ZELENÁ KŘIVKA) A TOKU (ŽLUTÁ KŘIVKA) NA ČASE.	- 42 -
OBR. 47: PWL CHARAKTERISTIKA Č.5($R_1=1\text{ M}\Omega$, $R_2=1\text{ M}\Omega$, $R_3=1\text{ M}\Omega$).	- 42 -
OBR. 48: ZÁVISLOST NÁBOJE (ZELENÁ KŘIVKA) A TOKU (ŽLUTÁ KŘIVKA) NA ČASE.	- 43 -

8 Seznam použitých přístrojů a programů

- Digitální osciloskop Agilent Infiniivision 2000X series
- Funkční generátor FG-700SC
- Laboratorní zdroj napětí Diametral P130R51D
- Pájecí stanice Vellemann VTSSC40N
- Notebook Lenovo G560
- Balík programů firmy Cadence (Capture, PCB Designer, PSpice, Allegro)
- Microsoft Office 2003